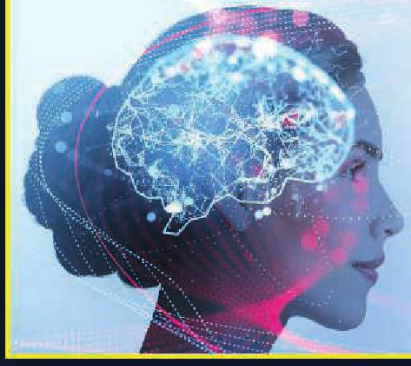
SCIENCES ET AVENIR



LIRE dans le CERVEAU

p.70

©STUDIO THONGDEN/SHUTTERSTOCK - IMAGEFLOW/SHUTTERSTOCK

TERRES RARES

Le nouvel or noir

p.28

SCIENCES ET AVENIR - N° 950 - AVRIL 2026 - TERRES RARES

AVRIL 2026 - N° 950 - BEL 5,70€ - LUX 5,70€ - CH 9,50CHF - D 7,40€ - IT 5,70€ - ESP 5,70€ - GR 5,70€ - PORT-CONT 5,70€ - DOM 5,90€ - NCAL 860XPF - MAR 85MAD - TUN 17TND - CAN 8,20$CAD

L 13418 - 950 - F: 5,30 € - RD

Hello Women

Elles font le changement

Aujourd'hui, les femmes sont encore sous-représentées dans les métiers technologiques et scientifiques qui façonnent le monde de demain.

Avec notre programme Hello Women, Orange s'engage pour changer la donne et accompagner les femmes à chaque étape de leur parcours.

De la découverte des métiers du futur à l'accès à l'emploi.
De la reconversion professionnelle à des carrières durables.
Jusqu'au soutien à l'entrepreneuriat féminin dans le numérique.

Chez Orange, les femmes représentent désormais 25% des métiers de la tech.

Ensemble, faisons bouger les lignes.

orange.com

orange™
est là

Orange SA - Société anonyme de droit français au capital de 10 640 226 396 euros - RCS Nanterre 380 129 866 - Siège social : 111, quai du Président Roosevelt - CS 70222 - 92449 Issy-les-Moulineaux Cedex France

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Indispensables terres rares

Le pétrole a fait le XXe siècle. Il a propulsé l'automobile, l'aviation, la pétrochimie — donc les plastiques, les engrais, les textiles synthétiques. Autour de lui se sont organisées les puissances, les guerres, les routes maritimes, les raffineries. L'or noir n'a pas seulement alimenté les machines : il a redessiné le monde. À la fin du siècle dernier, on annonçait sa fin sous le terme de *peak oil* : le moment où sa raréfaction ferait basculer l'économie mondiale dans une crise durable. Mais c'est une autre limite qui s'est imposée : l'urgence climatique. Avec la décarbonation et l'électrification, le cœur de la puissance industrielle s'est déplacé. Car, pour fabriquer des éoliennes, des moteurs électriques, des écrans, de l'électronique ou des équipements militaires, il faut des métaux. Parmi eux, les terres rares occupent une place à part. Non qu'elles soient réellement rares : on en trouve un peu partout, mais dispersées, en faibles concentrations.

Les propriétés singulières des terres rares en font le nouvel or noir

La difficulté n'est pas tant de les repérer, que de les séparer, de les raffiner, de les transformer. Autrement dit : de maîtriser une métallurgie complexe, coûteuse et polluante. Et c'est là que se joue l'essentiel. Aujourd'hui, la Chine assure près de 70 % de l'extraction mondiale et environ 90 % du raffinage des terres rares. Elle a construit cette domination en remontant toute la chaîne, des métaux aux aimants, puis aux moteurs et aux filières qui en dépendent, tandis que l'Europe laissait s'éroder ses positions. Comment en est-on arrivé là ? Peut-on encore combler ce retard, notamment grâce au recyclage ? Les terres rares sont le nouvel or noir de notre temps. Et parce que tout commence par leurs propriétés singulières, enfouies dans l'intimité de l'atome, une chose est sûre : sans comprendre leur science, on ne comprendra pas le XXIe siècle. ■

SCIENCES ET AVENIR

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233.304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK - 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15
Rédaction en chef Les Dossiers Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32 Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52 Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31 Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59, Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28, Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Chef(fe)s de service Rachel FLÉAUX (MULOT) (environnement, évolution) - 01.55.35.56.07, Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46, Hervé RATEL (adjoint, actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78, Mathias GERMAIN (La Recherche, biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33, Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23 Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27 Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueur Jean-Gabriel GANASCIA
Ont participé à ce numéro : T. de BASTARD, F. COSTES, P. KALDY, N. GUTIERREZ C., C. LABESQUE
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIFANT - 01.55.35.56.32
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Creatoprint
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable réabonnement Yasmina FERHAT - 01.55.35.56.64
Responsable du marketing direct Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et événements Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directrice de publicité Caroline GILLES - 01.44.88.89.03
Exécution Émilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20

Les Éditions Croque Futur SAS au capital de 10 100 000 euros associé UFIPAR (LVMH) - 41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Président et directeur de la publication Maurice SZAFRAN
Directeur général Thierry MASSÉ

Ce magazine est imprimé chez RotoFrance, 25, rue de la Maison Rouge 77185 Lognes
Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 % Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org
FR
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte : la lettre « Sciences et Avenir bienvenue aux abonnés », jetée sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés, ainsi que le message « Sciences et Avenir-offre spéciale parrainage ».
Commission paritaire n° 1126 K 79712.
ISSN 3040-0457. Distribué par MLP.

SOMMAIRE

Sciences et Avenir / N° 950 / Avril 2026

DOSSIER P. 28

TERRES RARES
Le nouvel or noir

Ces métaux aux propriétés exceptionnelles sont au cœur des technologies liées à la transition écologique. Où sont les réserves ? Comment s'affranchir de la domination chinoise ? Comment créer une filière de recyclage ? Éléments de réponse dans ce dossier.

P. 56

Renaturation : Les sols urbains passent au vert

Si la végétalisation est un enjeu pour les villes, les projets achoppent souvent par une méconnaissance de la complexité des sols. Des solutions originales sont avancées par des chercheurs.

P. 64

La menace des aliments ultratransformés

Les preuves scientifiques sur la nocivité de l'alimentation ultratransformée abondent. Et si la France n'a encore pris aucune mesure en la matière, aux États-Unis on parle déjà de crise sanitaire.

P. 78

L'enfance racontée par l'archéologie

Longtemps absents des récits historiques, les enfants des sociétés anciennes sont désormais au cœur de recherches approfondies : tombeaux, objets, représentations artistiques.

3 Édito

ÉVÉNEMENT

6 Tchernobyl, laboratoire naturel de l'évolution irradiée

SCIENCES FONDAMENTALES

10 ACTUALITÉS Voyage au cœur de notre galaxie / Les moteurs du magnétisme terrestre

26 Journal de l'IA : Quand l'IA parlera alsacien

46 Drones : l'intelligence artificielle à l'offensive

51 Relativité : et si les constantes variaient ?

54 Entretien Alda Mari : « Détecter les situations d'urgence sur les réseaux sociaux »

NATURE

14 ACTUALITÉS Sous la mer, les turbines du futur / Dans l'œil de l'IA, chaque ours est unique

56 Renaturation : Les sols urbains passent au vert

61 La culture du caoutchouc sous pression climatique

SANTÉ

18 ACTUALITÉS Un spray nasal contre les virus respiratoires / Thé ou café, des alliés contre la démence

64 Aliments ultratransformés : la crise sanitaire menace

70 Les neurotechnologies décryptent nos pensées

73 Donner une seconde vie à la peau

76 Nutrition : Les fromages blancs à la loupe

HISTOIRE

22 ACTUALITÉS Les étoiles cachées d'Hipparque / Un os relance l'énigme des éléphants d'Hannibal

78 Enfance : ce que l'archéologie raconte des premiers âges de la vie

83 Duel fatal à l'âge glaciaire

84 Un spinosaure à la crête impressionnante

86 Histoire des sciences : Expédition Lapérouse, une moisson de découvertes

RENDEZ-VOUS

90 Sélection livres

92 Expositions

94 Questions de lecteurs

95 Courrier

96 Le ciel d'avril

98 À retrouver sur le Web

SHUTTERSTOCK - WAGON LANDSCAPING - NICOLAS GUYONNET / HANS LUCAS - PEDICINI FOTOGRAFI / LA COLLECTION

VIT'ALL+

ACCOMPAGNEMENT GLOBAL
MÉNOPAUSE

Sérenité
& Sommeil

Équilibre hormonal & Confort
Avec ou **Sans** isoflavones

Équilibre
des microbiotes

+80%
de satisfaction

+ d'infos sur notre étude consommateur

www.vitalplus.com

ENTREPRISE FAMILIALE & FRANÇAISE DEPUIS 1987

Crédits photos © VIT'ALL+® / «Pour votre santé, mangez au moins cinq fruits et légumes par jour» - www.mangerbouger.fr

TCHERNOBYL
Laboratoire naturel de l'évolution irradiée

Quarante ans après l'accident nucléaire de 1986, la zone d'exclusion de Tchernobyl est devenue un terrain d'expérimentation involontaire pour étudier les effets des radiations sur le vivant, entre mutations génétiques, sélection naturelle et étonnantes formes d'adaptation.

Par Sylvie Rouat

SHUTTERSTOCK

◀ **Les mammifères carnivores** de la zone d'exclusion de Tchernobyl, dont les renards, accumulent des isotopes radioactifs dans leurs tissus. Paradoxalement, malgré cette contamination, la population de ces canidés dans la zone est très importante.

En 1986, l'Europe connaissait la plus grave catastrophe nucléaire civile de l'histoire. Depuis lors, nombre de chercheurs ont documenté les réponses du vivant à un environnement hautement radioactif. Le cauchemar commence le 26 avril. Cette nuit-là, les opérateurs de la centrale nucléaire de Tchernobyl, au nord de l'Ukraine, lancent un banal test de sécurité sur le réacteur n° 4. Mais un enchaînement d'erreurs humaines, d'opérations mal préparées et de défauts de conception entraîne un emballement. Le couvercle du réacteur est soufflé, le bâtiment éventré, et le graphite du cœur brûle pendant plusieurs jours. D'énormes quantités de substances radioactives sont projetées dans l'atmosphère en un panache qui survole une grande partie de l'Europe. Plus de 116 000 personnes sont évacuées et 230 000 autres relogées au cours des années suivantes au-delà de la zone d'exclusion, qui s'étend dans un périmètre de 30 km autour de la centrale.

Quatre décennies après la catastrophe, la nouvelle zone d'exclusion, d'une superficie d'environ 2600 km² (l'équivalent du Luxembourg), demeure l'une des zones les plus radioactives au monde : les césiums 134 et 137 contaminent toujours les sols et l'eau. Paradoxalement, l'éviction quasi totale des humains en a fait, malgré la radioactivité qui reste élevée, la troisième plus grande réserve naturelle d'Europe continentale. Ses forêts et prairies abritent aujourd'hui bisons, lynx, cerfs, loups, aigles, renards, oiseaux et autres chauves-souris, ainsi que des meutes de chiens descendant de ceux laissés sur place par les familles évacuées.

Ce réensauvagement d'envergure offre une image, souvent présentée comme paradisiaque, d'une région revenue à l'état naturel. On y trouve même des chevaux de Przewalski, considérés comme les derniers chevaux sauvages au monde. L'introduction de 36 individus a été organisée entre 1998 et 2004 par un programme de la réserve d'Askania-Nova, dans le sud de l'Ukraine. Cette population libre comptait plus de 150 individus en 2018. Depuis lors, leur suivi a été contrarié par le conflit russo-ukrainien. En février-mars 2022, les forces russes ont en effet occupé durant plusieurs semaines la zone d'exclusion, y creusant des positions et charriant à cette occasion du sol contaminé. Lors de leur retrait, ils ont laissé derrière eux des mines terrestres, qui ont déjà tué un cheval de Przewalski.

Les forêts devenues des réservoirs de radioactivité

Auparavant, les chercheurs ont montré divers effets des rayonnements ionisants sur la faune et la flore. Dans les premiers temps, les doses reçues furent extrêmement élevées. Une pinède située à 4 km du réacteur a vu ses arbres roussir, et par la suite, jusqu'à 90 % de ses pins sont morts. *« Ce phénomène a constitué l'un des indicateurs les plus visibles de l'effondrement écologique provoqué par le rejet de radionucléides »*, souligne Gülşah Yildiz Deniz, biologiste à l'université d'Atatürk (Turquie), dans un article publié en octobre dans la revue *Mutation Research*.

Au moment de l'accident, les pins sylvestres dominaient les peuplements forestiers autour de la centrale. En s'appuyant sur des données satellitaires et des expéditions de terrain menées de 2018 à 2021, l'écologue Maksym Matsala, du Centre de recherche forestière du sud ▶

de la Suède, a montré que ces conifères irradiés ont été peu à peu remplacés par des feuillus — bouleaux, trembles et saules —, moins sensibles aux radiations. Les études réalisées juste après la catastrophe ont en effet mis en évidence que les graines et pollens des plantes originelles — dont les pins — étaient non viables ou peu germinatifs, ce qui a mené à une sélection d'individus et d'espèces génétiquement plus aptes à survivre.
Des expériences de replantation de jeunes pins dans la forêt rousse ont par ailleurs montré que si certains d'entre eux pouvaient survivre, ils accumulaient de forts taux de radionucléides dans leur biomasse. Les forêts de Tchernobyl sont ainsi devenues au fil des ans des réservoirs de radioactivité. Les incendies de 2015, 2016 et 2020 dans cette zone ont-ils remis en suspension des particules dans l'atmosphère ? Probablement pas, selon une étude réalisée par des chercheurs de l'Institut norvégien de recherche climatique et environnementale, pour qui les rejets de l'incendie de 2020 *« étaient environ un milliard de fois moindre qu'en 1986 »*.
Du côté de la faune, la mortalité des petits mammifères a d'abord été massive dans les zones les plus contaminées. Mais ce sont surtout les micro-organismes et autres invertébrés présents dans les premiers centimètres du sol et dans la litière forestière qui ont été exposés aux plus forts dépôts de radionucléides. Dans les deux mois qui ont suivi l'accident, 90 % d'entre eux ont succombé dans un périmètre de 7 km autour de la centrale. Faute d'activité microbienne, la matière organique non décomposée s'est accumulée dans les sous-bois, compromettant le cycle des nutriments. Leur abondance a remonté dans les années suivantes, notamment grâce aux insectes venus des abords de la zone d'exclusion. Des espèces radiosensibles ont été remplacées par d'autres plus résistantes : les cloportes rugueux ont, par exemple, été supplantés par des cloportes du genre *Trachelipus*, auparavant plus rares.

ASNR

« Des animaux venant de zones moins contaminées peuvent compenser les pertes dans les populations de la zone d'exclusion »

Olivier Armant, chercheur à l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR)

Malformations et troubles du développement

De nombreuses études ont observé, au cours des dernières décennies, des troubles de la reproduction, des malformations du développement, une mortalité embryonnaire accrue, et une augmentation des taux de mutation et autres aberrations chromosomiques chez de nombreuses espèces. *« Les oiseaux se reproduisant dans la zone d'exclusion à la fin des années 1980, notamment l'hirondelle rustique, ont affiché des taux élevés d'albinisme partiel et d'autres anomalies morphologiques comme des becs déformés et des cataractes, directement liés à l'expo-*

SÛRETÉ NUCLÉAIRE

L'arche de confinement endommagée

Le 14 février 2025, un drone chargé d'explosif s'est abattu sur l'arche de protection du réacteur accidenté de Tchernobyl. Selon des experts de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) dépêchés sur place, l'événement a provoqué un *« incendie majeur dans le revêtement extérieur de la structure »*. Il en résulte un trou d'environ 15 m², qui compromet sa capacité de confinement, même si aucune augmentation des niveaux de radiation n'a été relevée. Si des réparations sommaires ont été effectuées en urgence, une restauration complète sera nécessaire à la sûreté nucléaire à long terme, selon l'agence. Des réparations supplémentaires seront entreprises en 2026, afin notamment d'empêcher les infiltrations d'eau. Il faudra attendre la fin du conflit pour la restauration complète. Cette arche massive en acier de 162 mètres de long a été mise en place en 2016, afin d'empêcher tout rejet radioactif du réacteur n° 4, détruit en 1986. Elle surmonte l'ancien sarcophage soviétique fragilisé. Prévue pour durer un siècle, elle devrait servir pour le démantèlement du réacteur. Bâties à distance du réacteur, ses 36 000 tonnes ont ensuite été déplacées jusqu'au réacteur. Un exploit technologique unique au monde.

VOLODYMYR TARASOV / NURPHOTO / AFP

Le trou créé en 2025 par un drone russe dans la structure protectrice des radiations de la centrale.

Selon leur degré de contamination, la peau des rainettes est plus foncée, un possible mécanisme de protection.

GERMÁN ORIZAOLA, PABLO BURRACO

sition aux radiations », explique Gülşah Yildiz Deniz. D'importantes altérations génétiques ont été également relevées dans les populations de mammifères, des rongeurs aux grands carnivores, des décennies après la catastrophe.

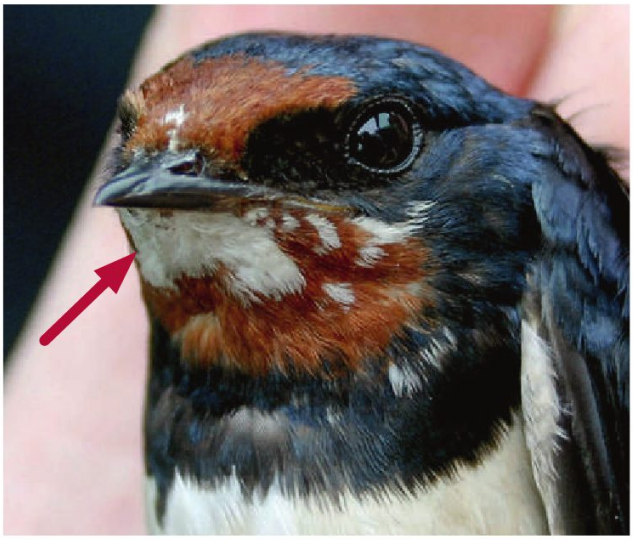
C'est le cas des loups gris, étudiés depuis 2014 par des chercheurs de l'université de Princeton (États-Unis), qui ont équipé certains individus de colliers GPS-dosimètres pour mesurer leur exposition aux radiations, et ont prélevé des échantillons sanguins pour analyser leurs réponses biologiques. Selon leurs mesures, ces loups sont encore aujourd'hui exposés quotidiennement à des radiations plusieurs fois supérieures aux limites humaines. Leurs analyses génétiques indiquent néanmoins que des régions de leur génome semblent montrer une résilience accrue au risque de cancer. Sur le long terme, il reste toutefois possible que la sélection naturelle favorise la survie d'animaux aux variantes génétiques plus à même de s'adapter dans un environnement irradié. « *Il s'agit là du biais du survivant,* explique Olivier Armant, chercheur à l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR). *Les animaux les plus fragiles meurent rapidement sous l'effet de la prédation ou de la pression de sélection, si bien que l'on observe surtout ceux qui survivent.* »

Des niveaux plus élevés d'antioxydants dans l'organisme

La difficulté est ensuite de déterminer si les mutations observées à Tchernobyl correspondent à une réelle adaptation, indépendante de la capacité de migration des individus. « *Des espèces comme le cheval de Przewalski ou le lynx peuvent parcourir de grandes distances,* note Olivier Armant. *Ces déplacements peuvent mélanger les populations et diluer les effets locaux : des individus venant de zones moins contaminées peuvent compenser les pertes ou les problèmes de santé dans les populations de la zone d'exclusion. D'autres espèces, en revanche, telles les rainettes arboricoles qui migrent d'environ 500 m d'une génération à l'autre, sont inféodées à l'endroit où elles vivent. C'est ce qu'on appelle des espèces philopatriques.* » Les rainettes arboricoles sont ainsi considérées comme « espèce sentinelle ». Des études mettent en évidence leur taux plus élevé de mutations génétiques près de la centrale. D'autres chercheurs ont par ailleurs montré, pour la même espèce, plus d'individus à la peau foncée. Cette surpigmentation pourrait jouer un rôle protecteur contre les radiations. « *Mais les amphibiens changent de couleur en fonction de leur environnement, ce qui rend difficile l'établissement de cause à effet* », note Oliver Armant.

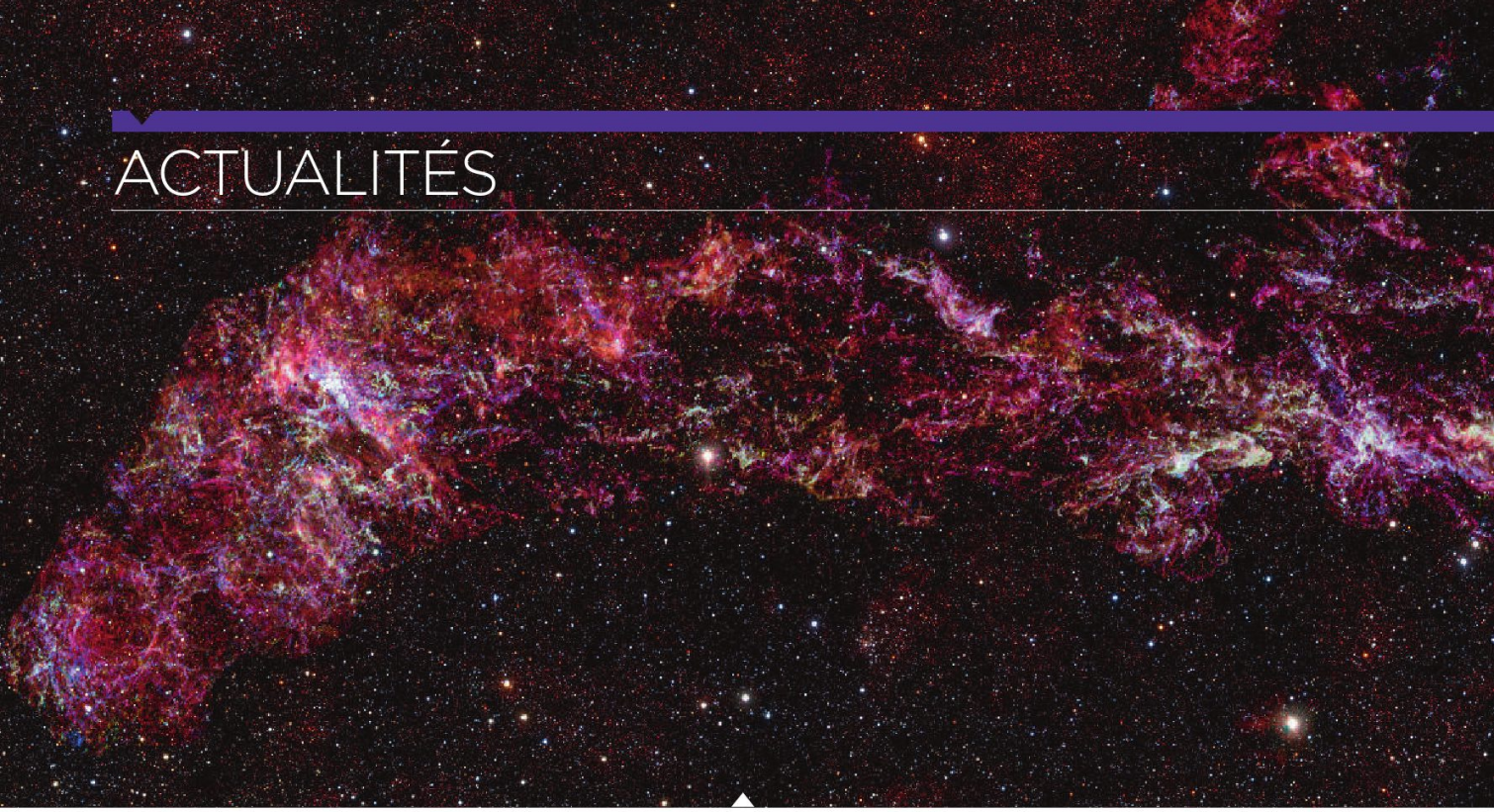
Chez les campagnols roussâtres, une autre espèce sentinelle, des études ont montré des niveaux plus élevés d'antioxydants dans l'organisme et une activité accrue d'enzymes capables de neutraliser les radicaux libres et de limiter les dégâts cellulaires. S'agit-il d'une forme d'adaptation ? Parmi les campagnols vivant depuis plusieurs générations dans des zones contaminées, les chercheurs ont de fait observé des niveaux de dommages à l'ADN relativement faibles par rapport à ce que l'on pourrait attendre avec ces doses de radiation.

La zone d'exclusion de Tchernobyl, avec ses populations d'animaux à la fois prospères et aux taux de mutation élevés, « *met en évidence l'équilibre complexe entre les dommages génétiques et les opportunités écologiques dans cet environnement unique* », conclut Gülşah Yildiz Deniz. ■



A.P. MØLLER, ET AL.

Cette hirondelle rustique présente un albinisme partiel des plumes de la gorge, causé par des mutations génétiques en lien direct avec l'exposition chronique aux radiations.



La plus grande image du centre galactique jamais réalisée par Alma montre la répartition du gaz moléculaire qui constitue la matière première des étoiles à naître.

Voyage au cœur de notre galaxie

Obtenue avec le radiotélescope Alma, cette image révèle la chimie foisonnante et les filaments de gaz qui nourrissent la formation d'étoiles au centre de la Voie lactée.

C'est le centre de notre galaxie tel qu'il n'avait encore jamais été vu. Ce vaste panorama de 650 années-lumière a été réalisé par le radiotélescope Alma (Atacama large millimeter/submillimeter array) et ses 66 antennes installées dans le désert d'Atacama, au Chili. Il dévoile toute la richesse de cette région, la zone moléculaire centrale (CMZ), entourant le trou noir supermassif niché au cœur de la Voie lactée.

« C'est un lieu d'extrêmes, invisible à nos yeux, mais désormais révélé avec une précision extraordinaire », s'enthousiasme dans un communiqué Ashley Barnes, astronome à l'Observatoire européen austral (ESO) et membre de l'équipe ayant obtenu ces nouvelles données.

De fait, le résultat a dépassé les espérances. *« Nous avions anticipé un haut niveau de détail lors de la conception du relevé, mais nous avons été véritablement surpris par la complexité et la richesse révélées par la mosaïque finale »*, explique Katharina Immer, astronome à l'ESO et également membre du projet.

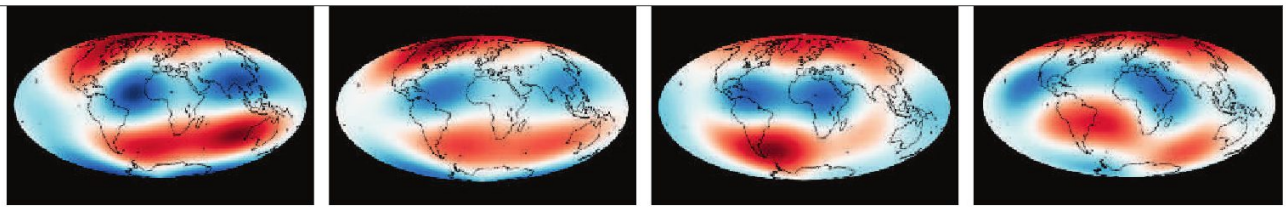
Mieux comprendre la croissance des galaxies

Le cliché a été pris dans le domaine des ondes millimétriques et submillimétriques, ce qui permet de « voir » les molécules de gaz froid qui peuplent l'endroit. Et il y a foule : environ 70 molécules différentes, des plus simples comme le monoxyde de silicium, aux plus complexes comme le méthanol, l'acétone ou l'éthanol.

Tout ce gaz moléculaire circule le long de filaments et alimente, tels des cordons ombilicaux, des amas de matière à partir desquels les étoiles se formeront. Ce processus s'observe ailleurs dans la Voie lactée, mais il reste encore mal compris dans l'environnement extrême du centre galactique, à proximité du trou noir central. *« La CMZ abrite certaines des étoiles les plus massives connues dans notre galaxie, dont beaucoup vivent rapidement et meurent jeunes, terminant leur vie dans de puissantes explosions de supernovae, voire d'hypernovae* [libérant jusqu'à cent fois plus d'énergie qu'une supernova], explique Steve Longmore, professeur d'astrophysique à l'université John-Moores de Liverpool, au Royaume-Uni.

« En étudiant la naissance des étoiles dans la CMZ, nous pouvons également mieux comprendre la croissance et l'évolution des galaxies. Nous pensons que cette région partage de nombreuses caractéristiques avec les galaxies de l'Univers primordial, où les étoiles se formaient dans des environnements chaotiques et extrêmes », conclut le chercheur. ■ **F. N.**

ALMA(ESO/NAOJ/NRAO)/S. LONGMORE ET AL. BACKGROUND: ESO/D. MINNITI ET AL.



UNIVERSITY OF LIVERPOOL

Les simulations suggèrent que deux masses chaudes sous l'Afrique et le Pacifique façonnent le champ magnétique de la Terre.

Les moteurs du magnétisme terrestre

Deux immenses structures rocheuses influencent le champ magnétique terrestre depuis des millions d'années.

Dans une étude publiée dans *Nature Geoscience*, des chercheurs de l'université de Liverpool (Royaume-Uni) montrent que deux immenses structures rocheuses surchauffées situées à la base du manteau terrestre, à environ 2900 km de profondeur sous l'Afrique et l'océan Pacifique, influencent le champ magnétique terrestre depuis des millions d'années. Pour cela, ils ont combiné l'étude des anciens champs magnétiques enregistrés dans les roches avec des simulations numériques de la géodynamo, reconstituant ainsi les 265 derniers millions d'années de mouvement du fer liquide dans le noyau externe, mouvement qui génère le champ magnétique. Ils ont ainsi découvert que la température à la frontière entre le manteau et le noyau est très hétérogène. Sous les zones les plus chaudes, le fer liquide du noyau peut ralentir ou stagner, alors qu'il circule plus activement sous les régions plus froides. Des différences qui influencent la forme et l'évolution du champ magnétique terrestre. **S. R.**

EN DEUX MOTS

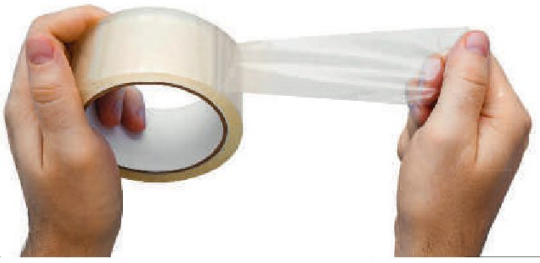
ESPACE Le lanceur européen Ariane 6 a réalisé son premier vol avec quatre accélérateurs pour mettre en orbite 32 satellites d'Amazon. **TECHNOLOGIE** La start-up Cortical Labs annonce la construction à Melbourne (Australie) et Singapour des deux premiers « data centers » biologiques utilisant des puces contenant des neurones vivants. **ROBOTIQUE** L'université de Cambridge (Royaume-Uni) a créé une peau artificielle en graphène qui a permis à un robot de sentir pression et texture comme un doigt humain.

Les cris supersoniques du ruban adhésif

PHYSIQUE Quelle est l'origine du bruit strident produit lorsqu'on déroule un ruban adhésif ? Grâce à des microphones et des caméras prenant jusqu'à 2 millions d'images par seconde, des physiciens ont découvert que le décollement du scotch engendre des microfissures successives qui se propagent à des vitesses supersoniques dans la largeur du ruban. En atteignant le bord, elles créent des trains d'ondes de choc dans l'air, des dizaines de fois à chaque milliseconde, si rapides que nos oreilles les perçoivent comme un crissement continu. **F. D.**

SOURCE : E. LI, UNIVERSITÉ DE SCIENCES ET TECHNOLOGIE DE CHINE.

GETTY IMAGES



1,4 milliard d'années
L'âge d'échantillons d'atmosphère

GÉOLOGIE **Des chercheurs ont retrouvé dans des cristaux de sel du nord de l'Ontario (Canada) des bulles d'air piégées lors de l'évaporation d'un lac subtropical. Elles offrent un rare aperçu de la composition de l'atmosphère terrestre il y a 1,4 milliard d'années.** **H. J.**

SOURCE : J. PARK, RENSSELAER POLYTECHNIC INSTITUTE (ÉTATS-UNIS).

MICROSOFT

La durée du stockage sur le verre serait de plus 10 000 ans.

Le verre, nouveau support pour les archives numériques

INFORMATIQUE Comment conserver de l'information pour les siècles à l'avenir ? Grâce au verre. C'est la promesse du projet Silica de Microsoft. Des chercheurs annoncent un procédé de stockage utilisant un laser ultrarapide pour écrire l'information dans l'épaisseur du verre. Sur un disque de 120 mm de côté et de 2 mm d'épaisseur, on peut ainsi stocker jusqu'à 4,8 téraoctets. Des tests suggèrent que les données pourraient rester lisibles plus de 10 000 ans. **F. N.**

DR. SEBASTIAN VOLTMER

Le corps glacé et ses deux queues photographiés lors de son passage près de la Terre.

La comète 3I/Atlas éjecte des composés organiques

C'est la première fois que de telles molécules sont détectées dans un astre formé autour d'une autre étoile.

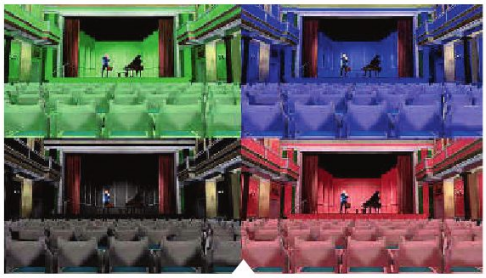
La comète 3I/Atlas, troisième objet interstellaire recensé qui traverse actuellement le Système solaire pour ne plus jamais y revenir, libère un cocktail de composés organiques : hydrocarbures mais aussi alcools, rapportent plusieurs équipes d'astronomes. C'est la première fois que de telles molécules sont détectées dans un astre formé autour d'une autre étoile. Les observations avant le périhélie, entre juillet et septembre 2025, avaient déjà révélé diverses substances : eau, monoxyde et dioxyde de carbone, sulfure de carbonyle, acide cyanhydrique, cyanogène, ainsi que nickel et fer. Mais en décembre, alors que le réchauffement des glaces cométaires et le dégazage s'intensifiaient, le télescope spatial James-Webb a aussi détecté du méthane. Une découverte confirmée par l'observatoire spatial SPHEREx de la Nasa : ses signatures spectrales correspondent à des hydrocarbures (méthane, éthane…), des alcools comme le méthanol et du formaldéhyde — des molécules impliquées dans la chimie prébiotique sur Terre. **F. D.**

ELLE A DIT

« Si on prouve que les pois sont comestibles, je serai la première à préparer du houmous lunaire »

Jessica Atkin, biologiste spatiale à l'université Texas A&M, à College Station (États-Unis), dont l'équipe est parvenue à faire pousser des plants de pois chiche dans un substrat reproduisant les propriétés du sol lunaire.

La couleur d'une salle de concert change la perception du son



DROUZAS ET AL.

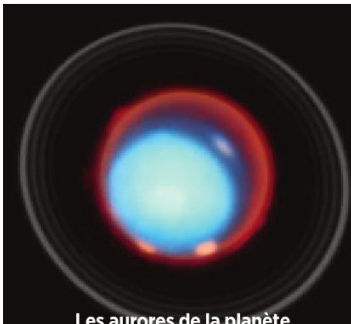
Les teintes bleues et vertes conduisent à une perception plus froide du son, au contraire des tons plus sombres.

ACOUSTIQUE Dans une expérience en réalité virtuelle, des chercheurs ont fait écouter des concerts dans des auditoriums simulés de différentes couleurs. Résultat : la couleur d'une salle de concert modifie la perception du son. Les teintes froides et saturées (bleu, vert) donnent l'impression d'un son plus froid, tandis que les salles plus sombres améliorent l'appréciation musicale. Mais le volume perçu, lui, ne change pas. **H. J.**

SOURCE : C. DROUZAS, UNIVERSITÉ TECHNIQUE DE BERLIN, ALLEMAGNE.

La mission Artemis II devrait décoller en avril

ESPACE Le lancement d'Artemis II, qui doit permettre à quatre astronautes de réaliser le premier vol en orbite lunaire depuis plus d'un demi-siècle (lire *S. et A.* n° 948), est reporté au plus tôt en avril. Avec plusieurs dates possibles : 1er, 3, 4, 5, 6 ou 30. Le décollage prévu initialement début février a dû être ajourné en raison d'une fuite de l'hélium servant à pressuriser les réservoirs de la fusée géante Space Launch System. **H. J.**



Les aurores de la planète apparaissent comme de petites taches roses.

La haute atmosphère d'Uranus cartographiée

ASTRONOMIE Le télescope spatial James-Webb a permis de cartographier en 3D la haute atmosphère d'Uranus, révélant comment son champ magnétique atypique façonne de spectaculaires aurores boréales jusqu'à 5000 km au-dessus des nuages. Des mesures de températures confirment par ailleurs que l'atmosphère se refroidit depuis plus de trente ans, sans que l'on en connaisse la raison. **J. I.**

SOURCE : PAOLA TIRANTI, UNIVERSITÉ DE NORTHUMBRIA, ROYAUME-UNI.

ESA/WEBB, NASA, CSA, STSCI

Chaque vendredi dans Les Echos

Votre journal s'enrichit, votre week-end aussi

À retrouver chaque vendredi :

- Le journal Les Echos
- Les suppléments **Les Echos Patrimoine** et **Les Echos Exquis**
- Le magazine Les Echos Week-End

Immobilier
Placements
Impôts

Mode
Art de vivre
Culture

Les Echos
Prenez un temps d'avance

+57

Le nombre de jours défavorables pour le café

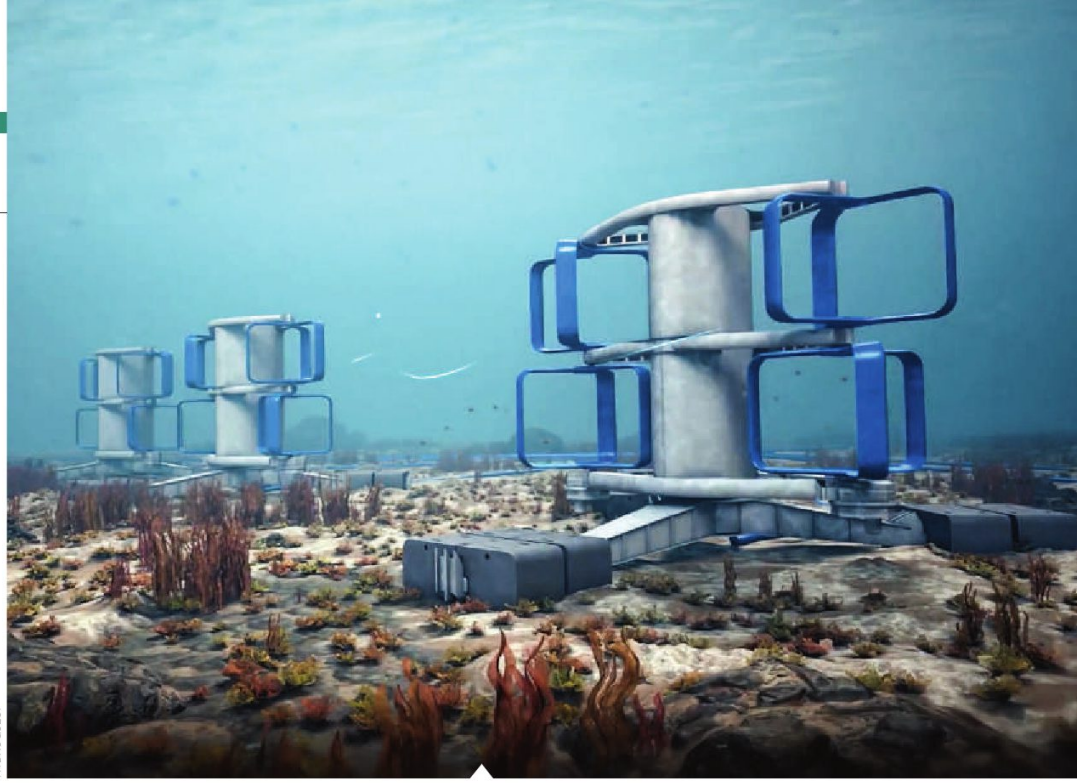
CLIMATOLOGIE Entre 2021 et 2025, en raison du réchauffement, les principaux pays producteurs de café ont subi en moyenne 57 jours supplémentaires où les températures ont excédé les 30 °C nuisibles à la pousse des caféiers et à la maturation de leurs baies. Au total, cela porte à 144 le nombre de jours défavorables pour l'arbre durant cette période. **L. C.**

Un nouveau lézard nommé « Zig zag »

HERPÉTOLOGIE En forme de ver, un corps allongé et miniaturisé, presque aveugle, c'est un lézard étrange qui a été découvert dans les étendues de sable blanc du nord-ouest de Madagascar. Cette espèce n'a pu être rattachée à aucun des 170 genres de lézards (pour 1800 espèces) existant sur la planète. C'est la première découverte d'un genre nouveau depuis le XIXe siècle. Les chercheurs du Muséum national d'histoire naturelle ont donc nommé le genre *Zig* et l'espèce *zag*. **L. C.**

MNHN

L'animal vermiforme est une nouvelle espèce endémique de Madagascar.



HYDROQUEST

Les hydroliennes du projet FloWatt commenceront à produire de l'électricité à partir de 2028 (modélisation).

Sous la mer, les turbines du futur

La nouvelle programmation énergétique acte l'essor de l'hydrolien. Première étape : une ferme sous-marine dans le raz Blanchard (Manche).

La 3e programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) publiée le 12 février a officiellement intégré une nouvelle source d'énergie renouvelable : l'hydrolien. La technique consiste à immerger des turbines dans les courants marins les plus puissants. La PPE prévoit une puissance installée de 250 mégawatts (MW) d'ici à 2030. Cette décision conforte le projet FloWatt, porté par la société Hydroquest. Il s'agit d'exploiter le courant du raz Blanchard, à l'extrême ouest de la pointe du Cotentin, l'un des courants marins les plus puissants d'Europe avec ses pointes à 12 nœuds (plus de 22 km/h). Le raz se situe sur une zone de hauts-fonds à environ 3 km de la côte. Intérêt de la technique : les courants sont réguliers, on peut donc prédire leur production. Dès cette année, six machines vont être construites à Cherbourg. Les hydroliennes d'Hydroquest associent quatre rotors verticaux pour un encombrement de 26 mètres de large pour 21 m de hauteur. Ces machines seront immergées par 35 m de profondeur, laissant 9 m de tirant d'eau pour la navigation.

Un potentiel français de production de 5 GW

Les concepteurs assurent que la rotation des pâles est trop lente pour constituer un obstacle pour la faune marine, notamment les poissons. Au total, cette première ferme hydrolienne au monde qui commencera à produire en 2028 sera d'une puissance de 17 MW, soit la consommation de 20 000 personnes par an. FloWatt constitue une démonstration de la faisabilité d'une technique qui intéresse aussi le Canada et le Japon. Le marché mondial est ainsi estimé à 300 milliards d'euros. Outre le raz Blanchard, la France peut également exploiter le courant du Fromveur en mer d'Iroise, où une hydrolienne pilote a fonctionné pour alimenter l'île d'Ouessant avant que la société exploitante ne fasse faillite en 2024. Avec ces deux espaces marins de 100 km², l'Hexagone possède un potentiel de production de 5 gigawatts (GW, l'équivalent de quatre centrales nucléaires) pour une production annuelle de 15 térawatts/heure, soit la consommation électrique de 8 millions de personnes. ■ **L. C.**

Les deltas s'enfoncent plus vite que la mer ne monte

GÉOLOGIE Dans de nombreux deltas du monde, le sol s'affaisse désormais plus vite que le niveau de la mer ne s'élève, révèle une analyse de dix ans de données radar du satellite Copernicus Sentinel-1 portant sur 40 grands deltas. Plus de la moitié s'enfoncent de plus de 3 mm par an, aggravant le risque d'inondations pour ces régions où vivent 5 % de la population mondiale. Cela pourrait représenter une menace au moins aussi importante que la montée des océans pour ces territoires. **H. J.**

IL A DIT

« L'eau à la surface de la Terre n'est peut-être que la partie émergée d'un gigantesque iceberg situé au plus profond de la planète »

Motohiko Murakami, professeur à l'École polytechnique fédérale de Zurich (Suisse), auteur d'une étude suggérant que le noyau terrestre recèlerait suffisamment d'hydrogène pour former l'équivalent de plusieurs océans.

La fonte des glaces influence la mousson indienne

CLIMATOLOGIE Moins il y a de banquise arctique, plus il y a de mousson. C'est la découverte réalisée par des chercheurs indiens après avoir comparé les données de recul de la glace de mer l'été avec les précipitations de la mousson annuelle de juin à septembre entre 1979 et 2022. La fonte toujours plus précoce de la banquise provoque des précipitations plus importantes, surtout en fin de mousson, les pluies se décalant désormais vers l'ouest de l'Inde. **L. C.**

SOURCE : ARCHANA RAI, INSTITUT INDIEN DE MÉTÉOROLOGIE TROPICALE, INDE.

S. KANOJIA/MIDDLE EAST IMAGES/AFP

Inondations dues aux pluies intenses en Inde en 2025.

DANIEL SANCHEZ

Échanges de signaux entre les deux insectes.

Les chenilles ont le sens du rythme pour parler aux fourmis

ENTOMOLOGIE Certaines chenilles de papillons produisent des vibrations rythmiques qui imitent les signaux des fourmis, montre une étude britannique. Ce langage leur permet d'être acceptées dans la colonie, où elles sont protégées des prédateurs et même nourries. En échange, elles sécrètent un liquide nutritif sucré dont les fourmis se nourrissent. **H. R.**

SOURCE : CHIARA DE GREGORIO, UNIVERSITÉ DE WARWICK, ROYAUME-UNI.

Dans l'œil de l'IA, chaque ours est unique

Une intelligence artificielle peut désormais identifier individuellement des ours bruns d'Alaska, malgré leur pelage uniforme.

EPFL/B.ROSENBERG

Près de 73 000 images d'ours d'Alaska ont servi à entraîner l'algorithme.

Des chercheurs de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse) et de l'université Alaska Pacific (États-Unis) ont présenté un algorithme capable de reconnaître chaque animal à partir de traits de la face : angle du front, forme du museau, position des oreilles ou cicatrices. Le défi était de taille : contrairement aux zèbres ou à certains oiseaux, les ours ne possèdent pas de motifs distinctifs, et leur apparence varie fortement selon les saisons, en raison de l'hibernation et des variations de poids. L'équipe a donc choisi de se concentrer sur la tête, une zone moins affectée par ces changements.

L'algorithme a été entraîné sur 72 940 photos de 109 ours, prises entre 2017 et 2022 en Alaska. Testé ensuite sur des images prises par des visiteurs, il a permis de reconnaître plusieurs individus connus et d'en détecter de nouveaux. Un outil prometteur pour suivre les populations sauvages et mieux comprendre l'écologie de ces grands prédateurs. **A. D.**

SERGIOPITAMITZ/BIOSPHOTO

Le secret poilu de la trompe d'éléphant

ZOOLOGIE L'agilité dont les éléphants font preuve avec leur trompe vient de l'extrême sensibilité du millier de vibrisses disposées tout le long de l'appendice, révèle une étude. Rigides à la base mais souples à l'extrémité, ces longs poils tactiles amplifient les vibrations du moindre contact et stimulent les récepteurs nerveux. **P. K.**

SOURCE : ANDREW SCHULZ, INSTITUT MAX-PLANCK, ALLEMAGNE.

7 ans La perte d'espérance de vie des dauphins du golfe de Gascogne

CÉTOLOGIE Selon des autopsies de cétacés échoués effectuées par l'université de La Rochelle, l'espérance de vie des dauphins femelles du golfe de Gascogne est passée de 24 à 17 ans en deux décennies. Une diminution alarmante pour cette espèce, dont les femelles ne mettent au monde qu'un petit tous les trois ans. Pour éviter les prises accidentelles, la pêche est désormais interdite en février dans tout le golfe. **L. C.**

L'œil de Lascar

L'ANALYSE des urines de chimpanzés du parc national de Kibale, en Ouganda, par une équipe américaine a révélé que ces singes, en se délectant de fruits fermentés, absorbaient en moyenne l'équivalent de deux verres de vin par jour. De quoi confirmer l'hypothèse du « singe ivre » qui veut que les primates consomment ces fruits pour ressentir les effets de l'alcool.

Forage record sous la glace de l'Antarctique

Une expédition internationale a extrait des archives géologiques inédites pour comprendre la stabilité passée de l'inlandsis.

Un forage record de 228 mètres dans la roche, sous 523 m de glace, vient d'être réalisé en Antarctique Ouest par le consortium international Swais. Jamais les forages rocheux sur le continent n'avaient dépassé une dizaine de mètres. Menée à 700 km de la station scientifique la plus proche, l'expédition Swais2C a mobilisé une trentaine de chercheurs de dix pays. Les carottes de sédiments devraient permettre de reconstituer l'évolution de la calotte glaciaire au cours des 23 derniers millions d'années, notamment lors de périodes où la température mondiale dépassait de 2 °C celle de l'ère préindustrielle. L'analyse des sédiments biologiques et minéraux indiquera si cette zone, située près de la mer de Ross, a été océan ouvert, mer recouverte de glace ou continent englacé. Ces données aideront aussi à comprendre les facteurs qui ont provoqué les retraits passés de l'inlandsis. Un enjeu majeur, car la calotte de l'Antarctique Ouest est aujourd'hui celle qui fond le plus rapidement. **P. K.**

ANA TOVEY / SWAIS2C

Un tronçon de la carotte de sédiments d'une longueur totale de 228 mètres.

Aux origines asiatiques du noyer domestique

BOTANIQUE

La domestication du noyer s'est effectuée dans le nord de l'Inde actuelle, montre l'étude génétique de près de 300 noyers répartis dans le monde. C'est dans l'ouest de l'Himalaya que se trouve la plus grande diversité génétique de cet arbre cultivé depuis plus de 10 000 ans. Trois gènes ont fait l'objet d'une sélection particulière et sont en rapport avec une coque plus fine, une fertilité accrue et l'accumulation d'huile dans la noix, des caractères propres à l'arbre domestique. **P. K.**

SOURCE : CAI-JIN CHEN, UNIVERSITÉ NORMALE DE PÉKIN, CHINE.

Réservé aux abonnés

SCIENCES ET AVENIR

Profitez des avantages numériques compris dans votre abonnement !

Chère abonnée, cher abonné,

Chaque semaine, la Rédaction de Sciences et Avenir crée et met en ligne sur www.sciencesetavenir.fr 15 articles exclusifs réservés aux abonnés que vous ne trouverez pas dans le magazine. Pour y accéder et profiter pleinement de tous vos services numériques, **vous devez activer votre compte abonné, vous aurez accès à la totalité de ces articles exclusifs.**

Vous avez également accès sur le site www.sciencesetavenir.fr à :

- **La lecture audio** des articles du site,
- **La bibliothèque numérique** avec les magazines compris dans votre abonnement,
- **10 vidéos entretiens/mois**,
- L'accès aux magazines sur votre smartphone ou tablette via **l'application « Sciences et avenir le magazine »**,
- L'accès au contenu du site sciencesetavenir.fr avec l'application « **Sciences et avenir** »,
- Une navigation zen allégée en publicité.

Comment accéder à tous ces services ? Il faut créer votre compte sur www.sciencesetavenir.fr :

1. Notez votre numéro d'abonné indiqué sur le « film » d'emballage de votre magazine (ex SCA 0/123456). Si vous ne l'avez pas, contactez le service client au 01 55 56 71 48 ou envoyez un mail à **abonnements@sciencesetavenir.com**
2. Rendez-vous sur www.sciencesetavenir.fr et cliquez sur « Se connecter »
3. Cliquez sur « créer un compte » et remplissez le formulaire avec les informations demandées.

Pour télécharger les applications Sciences et Avenir et Sciences et Avenir Le magazine

Si vous avez un smartphone ou une tablette Apple, rendez-vous sur l'App Store de votre appareil
Pour les autres smartphones et tablettes, rendez-vous sur le Google Play de votre appareil

Alors n'hésitez plus, rendez-vous dès à présent sur www.sciencesetavenir.fr

SCAACTIVATION25

68 021

Le nombre de décès dus au tabac en France

SANTÉ PUBLIQUE Selon un bilan pour l'année 2023 publié par Santé publique France, le tabagisme a causé la mort de 49 361 hommes et 18 660 femmes, en majorité par cancer, mais aussi du fait de maladies cardio-vasculaires et respiratoires. C'est moins qu'en 2015, où 75 000 décès étaient estimés. Un écart dû à la disparition progressive des générations *« ayant historiquement le plus fumé »,* selon l'agence. **H. J.**

Vers un médicament anti-décalage horaire

PHYSIOLOGIE Une molécule identifiée par des chercheurs japonais pourrait accélérer le recalibrage de l'horloge biologique après un décalage horaire, en agissant sur les mécanismes moléculaires qui contrôlent les rythmes circadiens. Testée chez la souris, elle a permis aux animaux de retrouver un cycle veille-sommeil normal en quatre jours, contre environ une semaine sans traitement. **N. G. C.**

SOURCE : YOSHIFUMI TAKAHATA, UNIVERSITÉ D'OSAKA, JAPON.

GETTY IMAGES

GETTY IMAGES

Après quatre doses de spray, les souris ont montré une immunité contre des virus et maladies respiratoires.

Un spray nasal contre les virus respiratoires

En activant les défenses immunitaires directement dans les poumons, ce candidat vaccin montre des résultats prometteurs chez la souris.

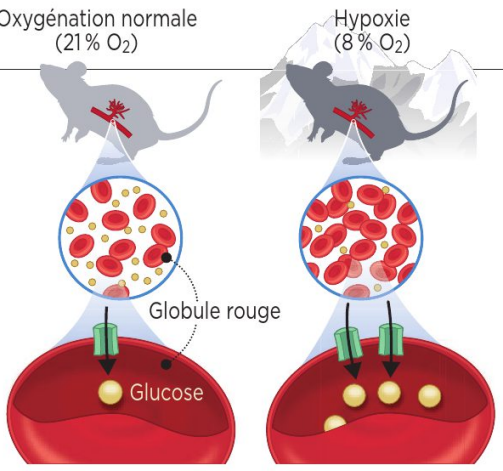
Un nouveau vaccin nous protégerait de la grippe, du rhume, du Covid-19 et de toutes les maladies respiratoires. Administré sous forme de spray, il semble montrer des preuves solides dans la revue *Science*. Cette fois, les scientifiques ne font pas le pari d'entraîner le système immunitaire comme dans les vaccins classiques : ils concentrent leurs efforts sur la façon dont les cellules immunitaires communiquent entre elles. *« Le système immunitaire acquis est bien plus ancien d'un point de vue évolutif,* explique le Pr Bali Pulendran, spécialisé en immunologie à l'université Stanford (États-Unis) et coauteur de ces travaux. *Toutefois, cette réponse immunitaire est en général très courte : elle s'estompe au bout de quelques jours, voire de trois semaines maximum.* » Pour contourner le problème, l'équipe a cherché à activer le système immunitaire directement dans les poumons.

Maintenir le système immunitaire en éveil

Or, pour atteindre ces organes, le meilleur chemin reste encore de passer… par le nez. D'où l'idée d'un spray nasal. Car le système immunitaire inné est comme « programmé » par chacun de nos tissus — et non par un agent pathogène global. Ainsi, une fois arrivé dans les poumons, le vaccin réussit à maintenir un état immunitaire localisé (globules blancs et macrophages) en état d'alerte permanent. Concrètement, ce spray nasal est composé de trois éléments principaux : deux molécules permettant de stimuler les macrophages ainsi que d'autres cellules immunitaires dans les poumons, tandis qu'un troisième composant active les lymphocytes T du système adaptatif. Ces derniers ont pour mission de maintenir le système immunitaire inné éveillé plus longtemps que la normale. Après quatre doses de spray nasal, les souris testées ont montré une immunité contre les coronavirus dont le Covid-19, ainsi que contre les bactéries causant des infections respiratoires. Elles ont aussi perdu leur hypersensibilité aux acariens. Des effets enthousiasmants, qui restent maintenant à reproduire chez les humains. ■ **C. L.**

Vivre en altitude diminue les risques de diabète

La raréfaction de l'oxygène conduit les globules à modifier leur métabolisme.



En état d'hypoxie, les globules rouges captent davantage de glucose, abaissant ainsi la glycémie.

BRUNO BOURGEOIS

Un environnement pauvre en oxygène modifie en profondeur la façon dont l'organisme régule le sucre sanguin. Une équipe américaine vient de montrer que, sous l'effet de l'altitude, les globules rouges adaptent leur métabolisme et captent davantage de glucose, contribuant à abaisser la glycémie. *« Lorsque nous avons administré du sucre à des souris en hypoxie, il a disparu de leur circulation sanguine presque instantanément »*, indique Yolanda Martí-Mateos, première auteure de l'étude parue dans *Cell Metabolism*. Un mécanisme qui a pu être corroboré par des observations chez l'humain et explique les plus faibles taux de diabète déjà observés chez les populations vivant en altitude (Tibet, Andes). Ces résultats ouvrent surtout une piste thérapeutique prometteuse : mimer cet effet pour améliorer la régulation du glucose et limiter les complications liées au diabète. **T. d. B.**

EN DEUX MOTS

PARKINSON Le Japon autorise la première thérapie par cellules souches pour régénérer les neurones dopaminergiques endommagés par la maladie de Parkinson. **CARDIOLOGIE** Une IA développée par des chercheurs du MIT (États-Unis) s'avère capable de prédire précisément l'évolution d'une insuffisance cardiaque sur un an. **CANNABIS** Une revue systématique dans *The Lancet Psychiatry* conclut à l'inefficacité du cannabis médicinal contre l'anxiété, la dépression ou le trouble de stress post-traumatique.

GARO/PHANIE

Le test d'Ishihara permet de détecter un trouble de la perception des teintes rouge et verte.

Le daltonisme aggrave le pronostic du cancer de la vessie

ONCOLOGIE Les patients daltoniens atteints d'un cancer de la vessie présentent un risque de mortalité supérieur de 52 % sur vingt ans, selon une étude américaine. En cause : la difficulté à percevoir le rouge, qui empêche souvent de détecter le principal signe précoce de la maladie, à savoir la présence de sang dans les urines. Cette méconnaissance retarderait le diagnostic, conduisant à une prise en charge de la maladie à un stade plus avancé. **H. J.**

SOURCE : EHSAN RAHIMY, UNIVERSITÉ STANFORD, ÉTATS-UNIS.

6 h 50 min

La durée moyenne de sommeil des Français

PHYSIOLOGIE Une enquête OpinionWay commandée par l'Institut national du sommeil et de la vigilance montre que les Français dorment en moyenne 6 h 50 min par nuit en semaine (14 minutes de moins qu'en 2025) et 7 h 48 min le week-end (10 minutes de plus qu'en 2025). La durée moyenne de la sieste, pratiquée au moins une fois par semaine par 46 % des Français, s'établit à 1 h 16 min. **H. J.**

Mpox : la piste de l'écureuil

INFECTIOLOGIE Une épidémie de Mpox (variole du singe), ayant touché un tiers d'un groupe de singes mangabeys en 2023 en Côte d'Ivoire, aurait pour origine un écureuil mangé par les primates. Les analyses génétiques montrent que le virus détecté chez les singes est quasi identique à celui retrouvé chez ce rongeur, renforçant l'hypothèse d'un réservoir animal à l'origine des transmissions vers l'humain. **H. J.**

SOURCE : F. LEENDERTZ, UNIVERSITÉ DE GREIFSWALD, ALLEMAGNE.

TAÏ CHIMPANZEE PROJECT/CARMEN RIUTORD-FE/HIOH

Un juvénile mangabey atteint de la variole du singe dans le parc national de Taï (Côte d'Ivoire) en 2023.

Une tumeur soignée avant la naissance

MÉDECINE Un fœtus atteint d'une tumeur vasculaire rare (syndrome de Kasabach-Merritt) a été traité *in utero*, une première pour cette pathologie. Pris en charge à l'hôpital Femme-Mère-Enfant de Mulhouse (Haut-Rhin), le cas a été diagnostiqué au troisième trimestre de grossesse. Les médecins ont administré à la mère du sirolimus, un médicament qui traverse le placenta, permettant de stabiliser la tumeur. L'enfant est né dans de bonnes conditions. Cette approche ouvre une piste pour traiter certaines malformations vasculaires graves. **H. J.**

S. BOZON / AFP

Issa, ici âgé de 3 mois, a été traité « in utero » par un médicament administré à sa mère.

GETTY IMAGES

Deux à trois tasses de café par jour permettraient de préserver les fonctions cognitives.

Thé ou café ralentissent le déclin cognitif

La caféine, issue du thé ou du café, réduirait le risque de démence, même chez les personnes porteuses de variants génétiques.

Boire du thé ou du café serait associé à une baisse du déclin cognitif, selon une récente étude publiée dans *Jama*. Le lien entre la consommation de caféine et des effets sur la cognition est étudié depuis longtemps. Mais jusqu'à présent, il était impossible de tirer des conclusions claires. Pour la première fois, une étude a suivi plus de 130 000 individus sur une période longue, jusqu'à 43 ans pour certains. Les résultats montrent que deux à trois tasses de café, ou deux tasses de thé quotidiennes, sont associées à la fois à une baisse du déclin cognitif et à une baisse du risque de démence. Les personnes qui boivent de grandes quantités, jusqu'à cinq tasses de café, profitent aussi d'effets positifs, mais dans une moindre mesure. Viennent enfin les « petits buveurs », chez qui les résultats, positifs toujours, sont les moins importants. Surtout, la caféine a continué de montrer un effet protecteur, et ce même chez les personnes porteuses du gène APOE4. Une seule copie de ce gène augmente de deux à trois fois le risque de développer un Alzheimer. **C. L.**

Un gène qui freine le tabagisme

GÉNÉTIQUE En analysant le génome de près de 38 000 fumeurs, des chercheurs montrent que les porteurs de certaines variantes rares du gène CHRNB3 — impliqué dans les récepteurs cérébraux à la nicotine — fument nettement moins que la moyenne. Ils confirment ainsi le rôle clé de ce gène dans la dépendance à la nicotine et pourraient orienter de futures stratégies de lutte contre le tabagisme. **H. J.**

SOURCE : GIOVANNI COPPOLA, CENTRE DE GÉNÉTIQUE REGENERON, ÉTATS-UNIS.

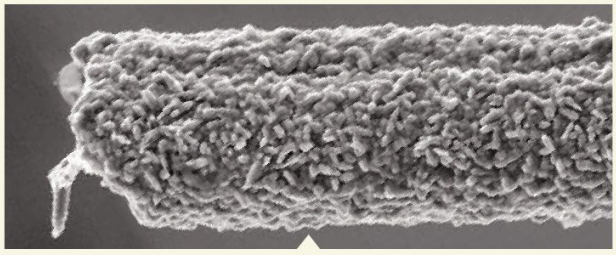
Une bactérie antique défie les antibiotiques

MICROBIOLOGIE Découverte dans une couche de glace vieille de 5000 ans dans la grotte de Scărișoara (Roumanie), la bactérie *Psychrobacter* SC65A.3 résiste à une dizaine d'antibiotiques modernes, dont certains de dernier recours. Son génome renferme près de 600 gènes inconnus et des capacités à combattre des microbes, dont 14 souches bactériennes hyper-résistantes, ce qui pourrait ouvrir de nouvelles pistes thérapeutiques. **H. R.**

SOURCE : CRISTINA PURCAREA, INSTITUT DE BIOLOGIE DE BUCAREST, ROUMANIE

Des électrodes gainées de diamant

NEUROTECHNOLOGIE Des chercheurs de l'université de Melbourne (Australie) ont mis au point de minuscules électrodes en fibre de carbone recouvertes d'une couche de diamant. Ce revêtement les rend plus stables au contact des tissus nerveux. Plus fines qu'un cheveu, ces fibres pourraient être implantées dans la moelle épinière pour capter et stimuler l'activité des neurones et, à terme, aider à rétablir des connexions nerveuses pour permettre à certains patients paralysés de remarcher. **H. J.**



UNIVERSITY OF MELBOURNE

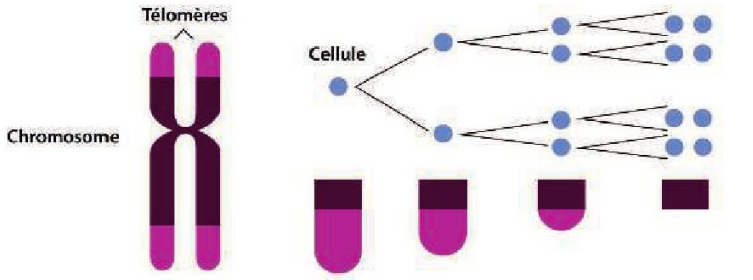
La fibre de carbone de 10 micromètres de diamètre, recouverte d'un revêtement en diamant (vue au microscope).

PUBLICITÉ

PHYTO RESEARCH

Télomères et longévité

Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).



Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase

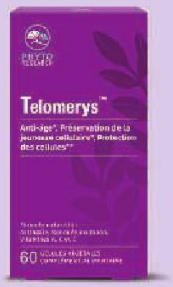
Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par déclencher la fin du cycle de reproduction de la cellule, appelé sénescence. Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales. Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

ASTRAGALE ET TÉLOMÈRES

Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifiques. **Telomerys** associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffisent pour constater une diminution significative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Telomerys™

Préservation de la jeunesse cellulaire



Disponible en pharmacie

Telomerys 60 gélules végétales est disponible grâce au code ACL 602 42 56

Livraison à domicile

Passez votre commande au **01 85 12 12 44** et sur www.vitalco.com

Telomerys™ est sélectionné et distribué par Vitalco.

Le cargo perdu de Temasek

ARCHÉOLOGIE Le plus ancien navire connu des eaux de Singapour vient d'être étudié : cette épave du XIVe siècle transportait 3,5 tonnes de céramiques chinoises, dont de rares porcelaines bleu-blanc de la dynastie Yuan. Sa cargaison confirme que l'ancien port de Temasek était déjà un carrefour majeur du commerce maritime en Asie du Sud-Est. **H. J.**

SOURCE : M. FLECKER, CONSEIL NATIONAL DU PATRIMOINE DE SINGAPOUR.

M. FLECKER

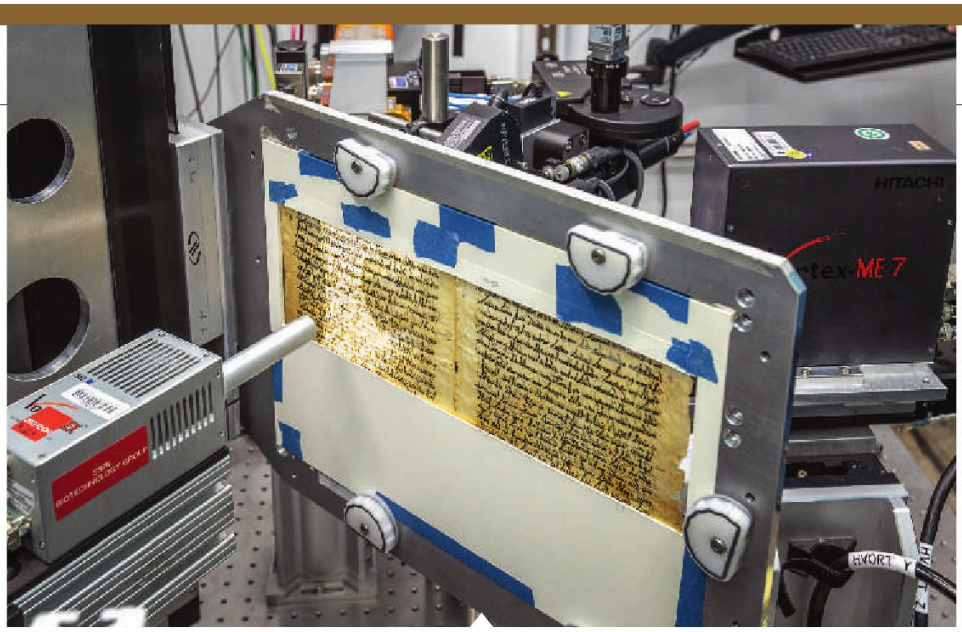
Fragment d'un bol de porcelaine chinoise retrouvé dans l'épave (XIVe siècle).

3000 ans

La stabilité génétique des habitants des Pays-Bas

PALÉOGÉNÉTIQUE Des chercheurs ont analysé l'ADN de 112 individus ayant vécu entre 8500 et 170 avant J.-C. dans la région Rhin-Meuse. Ils montrent qu'une grande partie des populations des actuels Pays-Bas, Belgique et nord-ouest de l'Allemagne est restée génétiquement stable pendant près de trois millénaires. **H. J.**

SOURCE : DAVID REICH, UNIVERSITÉ HARVARD, ÉTATS-UNIS.



J. RAMSEYER ORRELL / SLAC NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY

Les rayons X sont mobilisés pour révéler les encres antiques effacées puis recouvertes par l'écriture médiévale.

Les étoiles cachées d'Hipparque

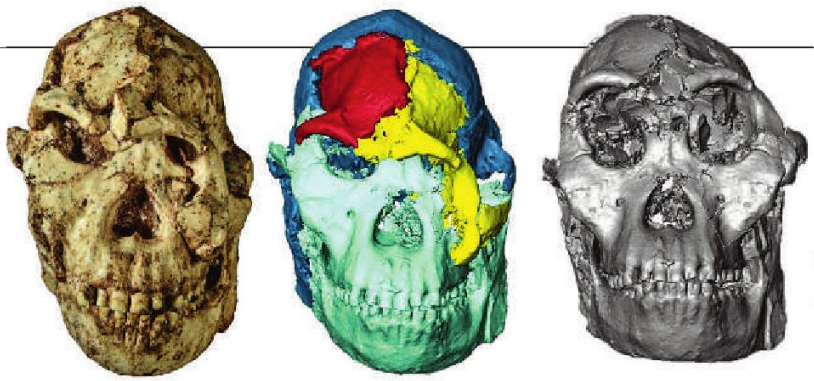
Des chercheurs ont déchiffré les traces d'observations de l'astronome grec sous un parchemin médiéval.

Deux mille ans après sa rédaction, le catalogue d'étoiles de l'astronome grec Hipparque (vers 190-vers 120 avant notre ère) continue de livrer ses secrets. Longtemps considéré comme perdu, ce texte fondateur de l'astronomie antique refait surface grâce à l'analyse d'un manuscrit médiéval du monastère Sainte-Catherine, au Sinaï (Égypte). Le document, connu sous le nom de *Codex Climaci Rescriptus*, est un palimpseste : un parchemin ancien dont le texte a été gratté pour être réutilisé au Moyen Âge. Sous l'écriture visible se cachent pourtant des traces d'un texte bien plus ancien. En 2022, l'imagerie multispectrale avait déjà révélé des extraits contenant des coordonnées associées à certaines constellations. Mais une nouvelle campagne d'analyses permet désormais d'aller plus loin. Les chercheurs utilisent la fluorescence X au synchrotron du Stanford Linear Accelerator Center (États-Unis) pour distinguer l'encre antique de l'encre médiévale : la première, riche en calcium, se différencie nettement de la seconde, dominée par le fer.

Des mesures d'une précision remarquable

Grâce à cette méthode, 11 feuillets du manuscrit ont été étudiés *recto verso* pour révéler de nouvelles coordonnées équatoriales d'étoiles ainsi que des dessins de constellations en cours d'identification. *« Ces données confirment qu'Hipparque avait probablement établi un catalogue couvrant l'ensemble du ciel visible »*, explique Victor Gysembergh, directeur de recherche CNRS au centre Léon-Robin de recherches sur la pensée antique, qui coordonne ces travaux. Les mesures, réalisées à l'œil nu depuis l'île de Rhodes (Grèce), semblent dater d'environ 129 avant notre ère. Leur précision — proche d'un degré — apparaît remarquable pour l'époque.

Au-delà de ce texte mythique, les chercheurs espèrent révéler bien d'autres écrits enfouis. Le monastère du Sinaï conserve en effet des milliers de parchemins anciens jamais étudiés avec ces méthodes. Le projet européen Palai, qui combine imagerie avancée et intelligence artificielle, vise à explorer systématiquement ces palimpsestes pour faire réapparaître traités scientifiques, œuvres littéraires ou textes religieux disparus. ■ **J. I.**



AMELIE BEAUDET

Réplique numérique (au centre) et reconstruction de la face (à droite) de l'australopithèque (original à gauche).

Le visage de Little Foot reconstitué

ANTHROPOLOGIE Le visage de l'un de nos plus anciens cousins humains se précise. Des chercheurs ont réalisé la première reconstitution numérique de la face de Little Foot, l'un des fossiles d'*Australopithecus* les plus complets connus. Grâce à des scans très précis et à un réalignement virtuel des fragments du crâne déformés par les sédiments, l'équipe a obtenu un modèle 3D détaillé. De quoi éclairer l'évolution du visage des premiers hominines en Afrique. **M. B.**

SOURCE : AMÉLIE BEAUDET, CNRS, FRANCE.

Une ancienne pluie de verre au Brésil

GÉOLOGIE Un immense champ de tectites (verres naturels formés lors d'impacts d'astéroïdes) vient d'être identifié au Brésil. Plus de 600 fragments vieux de 6,3 millions d'années ont été collectés sur près de 900 km. Ces tectites ont une composition riche en silice et des formes aérodynamiques typiques de roches fondues projetées dans l'atmosphère lors d'un impact, avant de retomber en pluie de verre. **S. R.**

SOURCE : ALVARO CRÓSTA, UNIVERSITÉ D'ÉTAT À CAMPINAS, BRÉSIL.

Un mini-dinosaure découvert en Patagonie

PALÉONTOLOGIE La découverte en Patagonie d'un squelette presque complet d'*Alnashetri cerropoliciensis*, vieux de 95 millions d'années et pesant environ 700 g, éclaire l'évolution en Amérique du Sud de ces théropodes aux bras courts terminés par une grosse griffe. Le fossile montre que ces animaux avaient à l'origine de longs bras et de plus grandes dents, avant d'évoluer vers des formes plus spécialisées. **J. I.**

SOURCE : PETER MAKOVICKY, UNIV. DU MINNESOTA, ÉTATS-UNIS.

G. DÍAZ YANTÉN, UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO NEGRO

Le théropode pesait moins d'un kilo (vue d'artiste).

IL A DIT

« Le graal serait de trouver un Dimetrodon *étouffé par son dernier repas avec dans son estomac un reptile contenant lui-même un poisson »*

Jean-Sébastien Steyer, du Muséum national d'histoire naturelle, commente la découverte d'un régurgitalithe, un vomi fossilisé de près de 290 millions d'années, éclairant la chaîne alimentaire des prédateurs avant les dinosaures.

Un os relance l'énigme des éléphants d'Hannibal

Découvert dans le sud de l'Espagne, un os carpien accrédite l'usage d'éléphants par le général carthaginois dans sa guerre contre Rome.

Près de deux millénaires après l'invasion du territoire romain par Hannibal Barca, un petit os pourrait relancer l'une des plus célèbres épopées militaires de l'Antiquité. Des archéologues ont mis au jour en Espagne un os carpien d'éléphant âgé d'environ 2200 ans, dans un niveau lié aux combats de la deuxième guerre punique (218-201 avant notre ère). La découverte a été faite sur le site de Colina de los Quemados, près de Cordoue, au milieu de projectiles de catapulte et de monnaies carthaginoises. Les analyses confirment qu'il s'agit bien d'un os d'éléphant, même si l'espèce précise du pachyderme reste inconnue. Selon des sources antiques, le stratège carthaginois mena des éléphants de guerre contre Rome, notamment lors de sa célèbre traversée des Alpes. Mais jusqu'ici, ces récits reposaient surtout sur les textes et l'iconographie. Ce vestige constitue donc l'un des rares indices matériels de la présence de ces animaux dans les armées carthaginoises en Europe occidentale, et ravive du même coup un grand débat historique. **M. B.**

BRIDGEMAN IMAGES

« Hannibal traversant les Alpes à dos d'éléphant », peinture de Nicolas Poussin (vers 1625-1626).

Deux millions d'années de piqûres

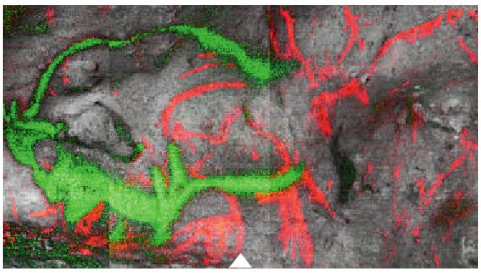
ÉVOLUTION L'attirance de certains moustiques pour le sang humain remonterait entre 1,6 et 2,9 millions d'années. En séquençant le génome d'espèces asiatiques du groupe *Anopheles leucosphyrus*, des chercheurs ont retracé l'apparition de ce comportement lié à l'installation durable d'*Homo erectus* en Asie du Sud-Est. Sa présence aurait favorisé les moustiques capables d'exploiter cette nouvelle source de sang. **J. I.**

SOURCE : CATHERINE WALTON, UNIV. DE MANCHESTER, ROYAUME-UNI.

Des peintures de Dordogne enfin datées

PRÉHISTOIRE Dans la grotte ornée de Font-de-Gaume (Les Eyzies), en Dordogne, des chercheurs ont pu obtenir des traces de charbon dans les pigments noirs des peintures, permettant pour la première fois leur datation directe au carbone 14 : autour de 13 000 ans. Jusqu'à présent, on ne pouvait dater avec certitude l'art pariétal de la région, y compris à Lascaux, les peintures étant réputées ne contenir que des oxydes de fer et de manganèse. **M. B.**

SOURCE : INA REICHE, CNRS, FRANCE.



TUDELFT, MATTHIAS ALFELD

Image hyperspectrale du « Carrefour » (grotte de Font-de-Gaume) : en rouge figurent les traces de charbon.

M. KEMP/ ALAMAY/ PHOTO12

Les unions auraient surtout eu lieu entre hommes néandertaliens et femmes « sapiens ».

Les amours asymétriques de Neandertal

Une analyse génétique éclaire d'un jour nouveau les métissages entre néandertaliens et humains modernes.

Lorsque néandertaliens et *Homo sapiens* se sont croisés il y a environ 50 000 ans, leurs unions concernaient surtout des hommes néandertaliens et des femmes *sapiens*. C'est ce que suggère une étude de l'université de Pennsylvanie (États-Unis) parue dans *Science*, qui a comparé l'ADN de néandertaliens à celui de populations africaines actuelles — très peu mêlées génétiquement à ces cousins disparus. Les chercheurs ont repéré chez les premiers un excès de gènes d'humains modernes sur le chromosome X, transmis par les mères. Ce signal montre que des femmes *sapiens* ont eu des enfants avec des hommes néandertaliens. Plusieurs hypothèses sont avancées pour expliquer cette asymétrie : un biais social ou démographique favorisant l'intégration de femmes *sapiens* aux groupes néandertaliens, ou une sélection naturelle ayant éliminé plus souvent les descendants issus d'unions dans l'autre sens. Aujourd'hui encore, les humains sans ascendance africaine récente ont 1 à 2 % d'ADN néandertalien. **H. J.**

Un dinosaure qui a du piquant

PALÉONTOLOGIE **Un dinosaure herbivore découvert dans la formation de Yixian, en Chine, révèle une particularité inattendue : un corps couvert d'épines cornées, comparables à celles d'un hérisson, inédit chez les dinosaures. Baptisé Haolong dongi, cet iguanodontien d'un peu plus de deux mètres vivait il y a 125 millions d'années. J. I.**

SOURCE : PASCAL GODEFROY, INSTITUT DES SCIENCES NATURELLES, BELGIQUE.

LANDESMUSEUM WÜRTTEMBERG

Plaquette gravée en ivoire de 3,8 cm de long trouvée en Allemagne (recto verso).

Des signes précurseurs de l'écriture

ANTHROPOLOGIE Des symboles gravés sur des sculptures et des outils vieux de 34 000 à 45 000 ans pourraient représenter l'un des premiers systèmes de transmission d'information. L'analyse de plus de 3000 marques (points, lignes ou encoches) sur 260 artefacts du paléolithique trouvés en Europe centrale montre qu'elles ont une complexité comparable à celles des premières écritures proto-cunéiformes, apparues 40 000 ans plus tard. **M. B.**

SOURCE : C. BENTZ, UNIVERSITÉ DE LA SARRE, ALLEMAGNE.

Sophia Boutique, la boutique des lecteurs de SCIENCES ET AVENIR

L'AFFAIRE DU MOIS

LA MONTRE
à mouvement automatique

76 ex à saisir !

139€ au lieu de 199€

Mouvement à remontage automatique par oscillation (28800 alternances par heure) • 180 pièces et 22 rubis • Boîtier en alliage doré haute densité IPG laissant apparaître la masselotte et l'ensemble du mécanisme

Guichet à 12 Heures : disque rotatif affichant Lune et Soleil en fonction de l'heure Bracelet cuir pleine fleur noir finition «alligator» • Réserve de marche : 36 heures • Diamètre du cadran : 45 mm

Délais de livraison : 15 jours maximum
Garantie : 2 ans

VUILLEMIN REGNIER

BON DE COMMANDE

À compléter et à renvoyer avec votre règlement sous enveloppe affranchie à :
SOPHIA BOUTIQUE
45, avenue du Général Leclerc
60643 Chantilly Cedex

	RÉF	QTÉ	PRIX	TOTAL
La montre à mouvement automatique	V167		139€	€
Frais d'envoi				OFFERTS
TOTAL DE MA COMMANDE				€

ADRESSE DE LIVRAISON

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code Postal

Ville :

Téléphone

E-mail : @

Pour la bonne gestion de votre commande, merci d'indiquer votre email

☐ J'accepte de revoir des offres par email des partenaires de Sophia Boutique.

MON MODE DE RÈGLEMENT

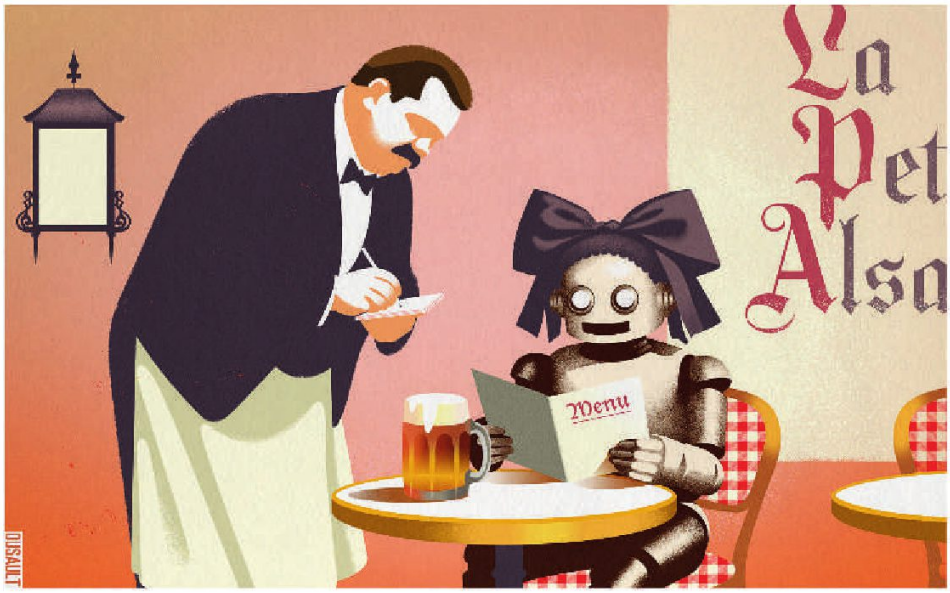
☐ Je règle par chèque à l'ordre de : Sophia Boutique

Signature obligatoire :

Je peux également régler par carte bancaire en contactant le 01 55 56 70 54 en précisant le code PSCA950, ou rdv sur www.sophia-boutique.com

Les Éditions Croque Futur situées au 41 bis avenue Bosquet, Paris 7e, et qui éditent Sophia Boutique sont responsables de traitement et collectent des données afin de servir votre commande. Vos données pourront être transmises à d'autres organismes (presse, VAD, caritatif) et sont conservées pour une durée de 3 ans à partir de votre commande. Vous pouvez exercer vos droits d'accès, de rectification, de limitation, de portabilité, d'opposition, d'effacement au traitement de vos données et définir vos directives postmortem à l'adresse mail suivante : dpo@sophiaboutique.fr en joignant une copie de votre carte d'identité. Les Éditions Croque Futur disposent d'un délégué à la protection des données pouvant être contacté au 41 bis avenue Bosquet, Paris 7e ou à l'adresse mail dpo@sophiaboutique.fr. À tout moment vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL.

PSCA950



ANTOINE MOREAU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR

Quand l'IA parlera alsacien

L'Inria et l'université de Strasbourg ont lancé un appel à une collecte de données vocales en alsacien destinées à entraîner des algorithmes. Le breton et le picard feront l'objet d'une démarche similaire.

À l'heure où l'écosystème de la synthèse vocale et des agents conversationnels reste dominé par l'anglo-américain, le projet Colaf (Corpus et outils pour les langues de France) de l'Inria tient du sacerdoce : faire exister les langues régionales. Pourtant, une campagne de collecte d'extraits vocaux dans ces langues, destinés à l'entraînement d'algorithmes, est en cours. Appelée Parole spontanée, elle dispose d'un espace *ad hoc* sur la plateforme en ligne CommonVoice. N'importe quel locuteur volontaire peut ainsi s'enregistrer, à condition (pour l'instant) qu'il parle alsacien.

L'alsacien est en effet la première langue concernée, et l'université de Strasbourg est partenaire du projet. Suivront le breton, le picard, sans doute le shimaorais (parlé à Mayotte) et peut-être le corse. *« Il faut beaucoup de données si on veut développer un système de reconnaissance et de synthèse de la parole,* insiste Slim Ouni, responsable de l'équipe-projet Multispeech (CNRS, Inria et université de Lorraine). *Or, concernant les langues régionales, on est très loin des volumes de données dont bénéficient les systèmes à l'état de l'art utilisés tous les jours.* » De tels corpus existent sur Internet, mais surtout conçus pour les linguistes, ils sont peu adaptés à des travaux en intelligence artificielle (IA). *« Cette campagne vise à les compléter par des données de paroles correspondant à des usages de tous les jours »*, précise Pascale Erhardt, maîtresse de conférences en sociolinguistique à l'université de Strasbourg.

POUR EN SAVOIR PLUS

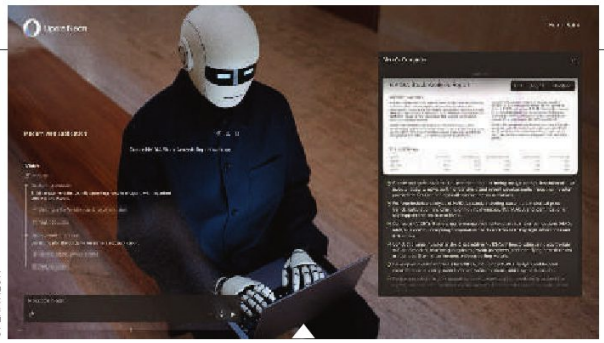
▸ L'espace Parole spontanée sur CommonVoice : sciav.fr/950parole

L'internaute est invité à répondre à une ou plusieurs questions sur des sujets très banals proposés par l'interface, sur le ton de la conversation, y compris dans un brouhaha ambiant. Il peut aussi retranscrire des sons d'autres intervenants, étape essentielle pour étiqueter les données et faire « apprendre » la langue à l'algorithme. Cette dimension participative inclut encore la proposition de questions dans la langue, la validation de celles soumises par d'autres (notamment pour éviter les dérives) ou même des transcriptions. Les contenus validés sont versés dans une base de données téléchargeable par n'importe qui.

Explorer la variété linguistique

L'opération n'est pas limitée dans le temps. *« Tant que la démarche intéresse les gens, ils peuvent continuer à répondre et à enrichir la base. Elle n'appartient pas au projet Colaf mais à l'utilisateur, aux locuteurs »*, note Sam Bigeard, ingénieur chef de projet.

Débuter par l'alsacien a un intérêt particulier : cette langue n'est pas enseignée à l'école, mais apprise par transmission familiale et sociale. Prononciation et écriture ne sont donc pas standardisées. Il existe une variété linguistique que les chercheurs en IA souhaitent explorer et que les experts en dialectologie veulent analyser. Avec l'ambition d'associer aux algorithmes d'apprentissage automatique ce qui leur manque souvent : de l'explicabilité. En l'occurrence, celle des subtilités d'une langue générée. ■ **Arnaud Devillard**



OPERA NEON

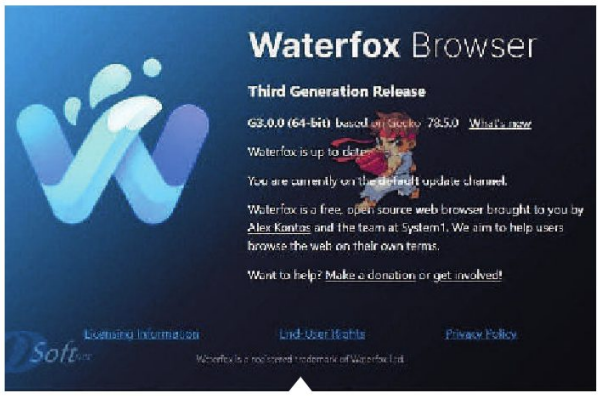
L'interface Neon propose plusieurs fonctionnalités axées sur l'IA.

L'IA agentique gagne Opera

NAVIGATION La société norvégienne Opera avait dévoilé son nouveau navigateur Neon en mai 2025, une version « agent IA », façon Comet de Perplexity. Alors accessible sur liste d'attente, elle est désormais proposée à tout le monde moyennant 19,95 dollars par mois. L'interface permet de coder des applications Web, de faire des réservations, de chatter, de créer des contenus, le tout en utilisant toute une palette d'IA : Gemini 3 Pro, GPT-5.1, Veo 3.1, Nano Banana Pro. **A. D.**

16 km²

La surface de panneaux solaires (4 x 4 km²) envisagée par la start-up américaine Starcloud pour son projet de datacenter dans l'espace de 5 gigawatts.



WATERFOX

Le navigateur Waterfox n'intégrera pas de modèles de langage.

L'IA dans Firefox, pas dans Waterfox

LLM La fondation Mozilla a annoncé fin 2025 son ambition d'intégrer des modèles de langage dans le navigateur open source Firefox. En réponse, le fondateur de Waterfox, un navigateur dérivé, revendique une stratégie inverse. Dans un billet de blog, il a assuré qu'il n'y aura « *pas d'IA* » dans Waterfox (plus exactement : pas de LLM), tant que ces technologies manqueront de transparence et de traçabilité sur ce qu'elles font et comment. **A. D.**

BRUNO LÉVY

LA CHRONIQUE DE
JEAN-GABRIEL GANASCIA*

Pourquoi lire encore à l'heure des LLM ?

Les grands modèles de langage (LLM) écrivent à notre place. Ils génèrent toutes sortes de textes : articles scientifiques, dissertation, fictions, même des programmes informatiques. Finie l'angoisse de la page blanche ! Quel réconfort ! Mieux encore : ces machines lisent pour nous, résument projets, romans, traités philosophiques, mémoires de recherche… Que de temps gagné pour les lycéens, étudiants et praticiens de toutes les professions de l'écrit. Des grincheux objectent les erreurs, ce qu'on appelle les « hallucinations », même si le terme prête quelque peu à confusion, puisque ces machines ne perçoivent pas au sens propre, mais qu'elles se contentent de galéjer de temps à autre. Les optimistes rétorquent que tout s'améliore. Déjà GPT-5.2 n'aurait rien à voir avec les versions précédentes ; quant à Claude opus 4.6, il pulvériserait tous les records. Et, demain, GPT-6, Claude opus 5, Gemini et autres les surpasseront et ne se tromperont plus jamais, disent-ils… Doit-on les croire ? Au-delà, un nouveau problème apparaît : un récent rapport de l'Anssi (Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information) sur l'IA générative explique que les LLM sont vulnérables à des attaques informatiques de type nouveau (injection de prompts, empoisonnement de données, etc.) susceptibles de fausser leurs réponses sur des sujets précis, par exemple sur les résultats d'entreprise. Puisque désormais tous ou presque écrivent avec des LLM, et que ceux-ci peuvent avoir été viciés par des cybercriminels, on doit se défier de tout. Seule solution pour déjouer les pièges consécutifs à ces malversations : décrypter les textes, les analyser dans le détail, les confronter à d'autres pour s'en faire une idée personnelle, bref, lire par soi-même, et non par machine interposée ! ■

* **Professeur à Sorbonne Université,** à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *L'I.A. expliquée aux humains*, Seuil, 2024.

TERRES RARES

Le nouvel or noir

Ces métaux stratégiques aux propriétés chimiques exceptionnelles sont indispensables au développement des nouvelles technologies, notamment dans le domaine de la transition écologique. Où se situent les réserves minières ? Comment s'affranchir de la domination chinoise ? La France a-t-elle les moyens de créer une filière de recyclage efficace ? Éléments de réponse dans ce dossier.

Dossier réalisé par
Loïc Chauveau, Fanny Costes, Franck Daninos, Fabrice Nicot, Mathieu Nowak, Sylvie Rouat.
Infographies : Mehdi Benyezzar

SHUTTERSTOCK

SOMMAIRE

ENTRETIEN Philippe Chalmin : « Des métaux à la fois stratégiques et critiques » p. 30 **RESSOURCES** Ni terres, ni rares, et pourtant si précieuses p. 32 **CHIMIE** Les superpouvoirs des terres rares p. 35 **APPLICATIONS** Le moteur de la transition écologique p. 38 **EXTRACTION** Un coût environnemental exorbitant p. 40 **VALORISATION** Le recyclage, l'autre mine d'or des terres rares p. 42 **ENTRETIEN** Philippe Bihouix : « Ce sera compliqué de les remplacer » p. 45

PHILIPPE CHALMIN
HISTORIEN ET ÉCONOMISTE

Des métaux à la fois stratégiques et critiques

Ce spécialiste des matières premières détaille les enjeux autour des terres rares. Ce sont des métaux stratégiques car leurs propriétés chimiques exceptionnelles sont indispensables au développement des nouvelles technologies. Mais ce sont aussi des métaux dits critiques car leur production est concentrée aux mains de partenaires peu fiables comme la Chine.

Quand les terres rares sont-elles devenues le « nouvel or noir » ?
Pendant longtemps, elles ne l'étaient pas. Les terres rares étaient considérées comme de simples produits chimiques. Dans les années 1970-1980, la France, avec Rhône-Poulenc puis Rhodia, était même le premier producteur mondial de ces produits qui n'étaient pas jugés stratégiques. L'usine de Rhodia, à La Rochelle, traitait un minerai venu d'Australie, légèrement radioactif. À l'époque, la municipalité de la cité charentaise mettait beaucoup de pression environnementale sur l'usine. Finalement, Rhodia a arrêté la production et a délocalisé en Chine. C'est ce qu'on appelle une délocalisation environnementale. Je le dis souvent : ce qui est stratégique aujourd'hui ne l'était pas forcément hier, et ne le sera peut-être pas demain. Ce n'est pas propre aux terres rares. Un métal comme l'étain, par exemple, a connu un premier âge d'or avec l'âge du bronze, puis un second à la fin du XIXe siècle avec le fer-blanc et les boîtes de conserve. Ensuite, il a perdu de l'importance et plus personne ne s'y intéressait dans les années 1980 et 1990. Aujourd'hui, il est redevenu indispensable pour les soudures dans l'industrie des semi-conducteurs. Et il sera peut-être de nouveau contournable dans dix ans.

BIO EXPRESS

- **1951 :** Naissance à Bordeaux.
- **1974 :** Diplômé de HEC.
- **1977 :** Agrégation d'histoire.
- **1981 :** Doctorat en lettres et sciences humaines.
- **1985 :** Fondateur de Cyclope, principale structure de recherche et d'études en France sur les marchés internationaux.
- **1994 :** Professeur d'histoire économique à l'université Paris-Dauphine.
- **1999 :** Directeur du master 212 Affaires internationales à l'université Paris-Dauphine.

Qu'est-ce qui a fait des terres rares une ressource stratégique ?
D'un point de vue économique, on ne parlait pas vraiment des terres rares avant le début du XXIe siècle. L'intérêt s'est vraiment accéléré dans les années 2010. Ce changement est lié à certains développements technologiques, notamment les aimants permanents que l'on trouve aujourd'hui dans les automobiles, dans les éoliennes et dans beaucoup d'équipements électroniques (*lire p. 38*). Un métal stratégique est une matière indispensable à certaines industries sensibles : la défense, l'armement, mais aussi l'ensemble du complexe industriel d'un pays. Un métal devient critique lorsque sa production est contrôlée par des acteurs qui ne sont pas forcément des partenaires fiables. Aujourd'hui, beaucoup de métaux sont critiques parce que leur métallurgie est concentrée en Chine. Le cobalt, le lithium ou l'étain sont devenus critiques. Les terres rares, qui n'étaient même pas stratégiques à la fin du XXe siècle, sont devenues à la fois stratégiques et critiques, en raison de la concentration de la métallurgie en Chine.

Que se passerait-il si la Chine coupait l'approvisionnement ?
Nous serions dans une situation très difficile. Une grande partie des chaînes industrielles serait touchée. La Chine représente 69 % de la production minière mondiale. Mais le véritable goulot d'étranglement n'est pas la mine. Le minerai de terres rares existe un peu partout (*lire p. 32*). L'une des plus grandes mines du monde est celle de Mountain Pass, aux États-Unis [qui a produit 45 000 tonnes en 2024

PATRICK FOUQUE/PARISMATCH/SCOOP

pour une production mondiale de 390 000 tonnes], mais le concentré qui y est extrait est envoyé en Chine pour être traité parce qu'il n'y a plus de capacité de métallurgie ailleurs ! De plus, la métallurgie est une activité assez polluante. Enfin, la Chine a aussi misé sur les produits manufacturés, notamment les aimants permanents, comme elle l'avait fait auparavant avec le lithium et le cobalt en allant jusqu'à la fabrication des batteries et même des véhicules électriques. Aujourd'hui, dans le secteur de l'éolien par exemple, les principaux acteurs industriels mondiaux sont chinois.

Le marché est en croissance de 13 % par an depuis 2015. Cette tendance va-t-elle se poursuivre ?

Comme nous l'avons écrit dans le dernier rapport Cyclope *, le marché actuel est tiré par quatre éléments en particulier, qui portent, à eux seuls, 90 % de la valeur économique de la filière, à savoir : le néodyme (Nd), le praséodyme (Pr), le dysprosium (Dy) et le terbium (Tb). Ces terres rares dites magnétiques sont principalement utilisées sous forme d'alliages pour la production d'aimants permanents de haute performance, en particulier pour la technologie d'aimants néodyme-fer-bore (NdFeB). Les principaux moteurs de cette demande, progressant de près de 10 % par an, suivent l'essor des véhicules électriques, de l'éolien *offshore*, ainsi que celui de l'électronique et de la robotique, utilisant de grandes quantités d'aimants permanents. Aujourd'hui, dans tous les laboratoires, on cherche probablement à substituer ces éléments. Mais à moins d'une rupture technologique majeure, la demande devrait continuer à croître dans les prochaines années. Car le temps des innovations technologiques est long. Et il faut une dizaine d'années pour mettre en place une filière de recyclage.

> « À moins d'une rupture technologique majeure, la demande en terres rares devrait continuer à croître dans les années à venir »

La France ou l'Europe pourraient-elles reconstruire une filière ?

Je pense qu'il le faudrait. Il reste sans doute encore des compétences. Rhodia a été racheté par Solvay, qui essaie de relancer certaines activités. Dans le bassin de Lacq (Pyrénées-Atlantiques), il y a aussi le projet de Carester (*lire p. 42*), mené par des anciens de Rhodia, mais il porte surtout sur le recyclage. Il faut rappeler que la métallurgie est un secteur qui se construit sur des temps longs. Or, rien ne dit que les terres rares d'aujourd'hui seront toujours aussi stratégiques dans dix ans ! ■

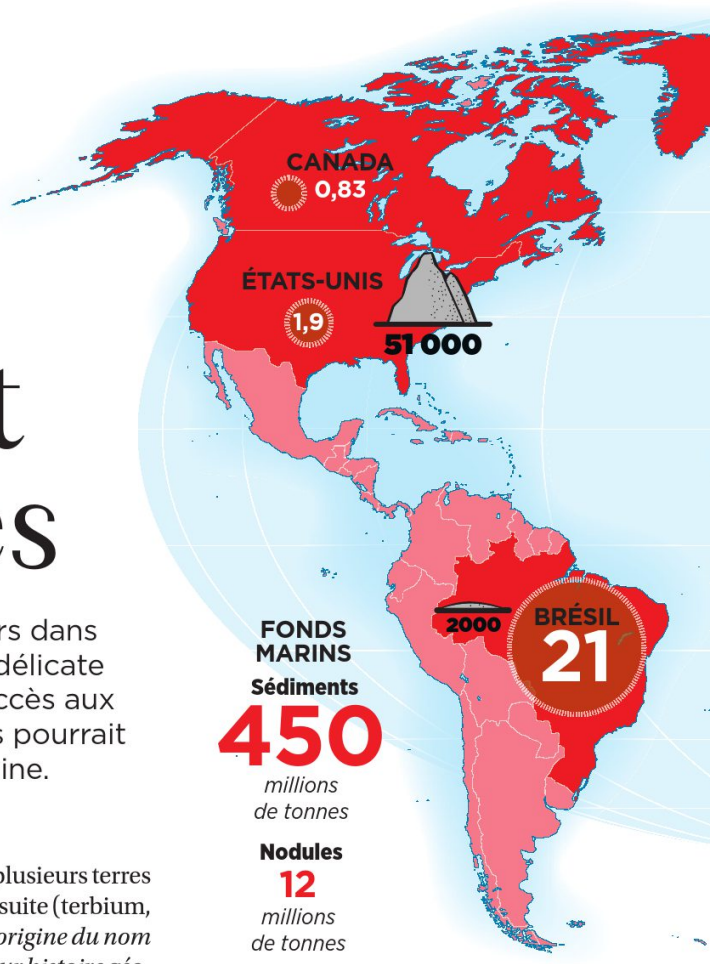
Propos recueillis par M. N.

* « Cyclope : Les marchés mondiaux 2026 », sous la direction de Philippe Chalmin et Yves Jégourel, à paraître en juin 2026 aux éditions Economica. https://cercle-cyclope.com

RESSOURCES

Ni terres, ni rares, et pourtant si précieuses

Ces métaux sont présents à de faibles teneurs dans les roches de la croûte terrestre, ce qui rend délicate leur détection et coûteuse leur extraction. L'accès aux vastes réserves estimées dans les fonds marins pourrait mettre un terme à la domination de la Chine.

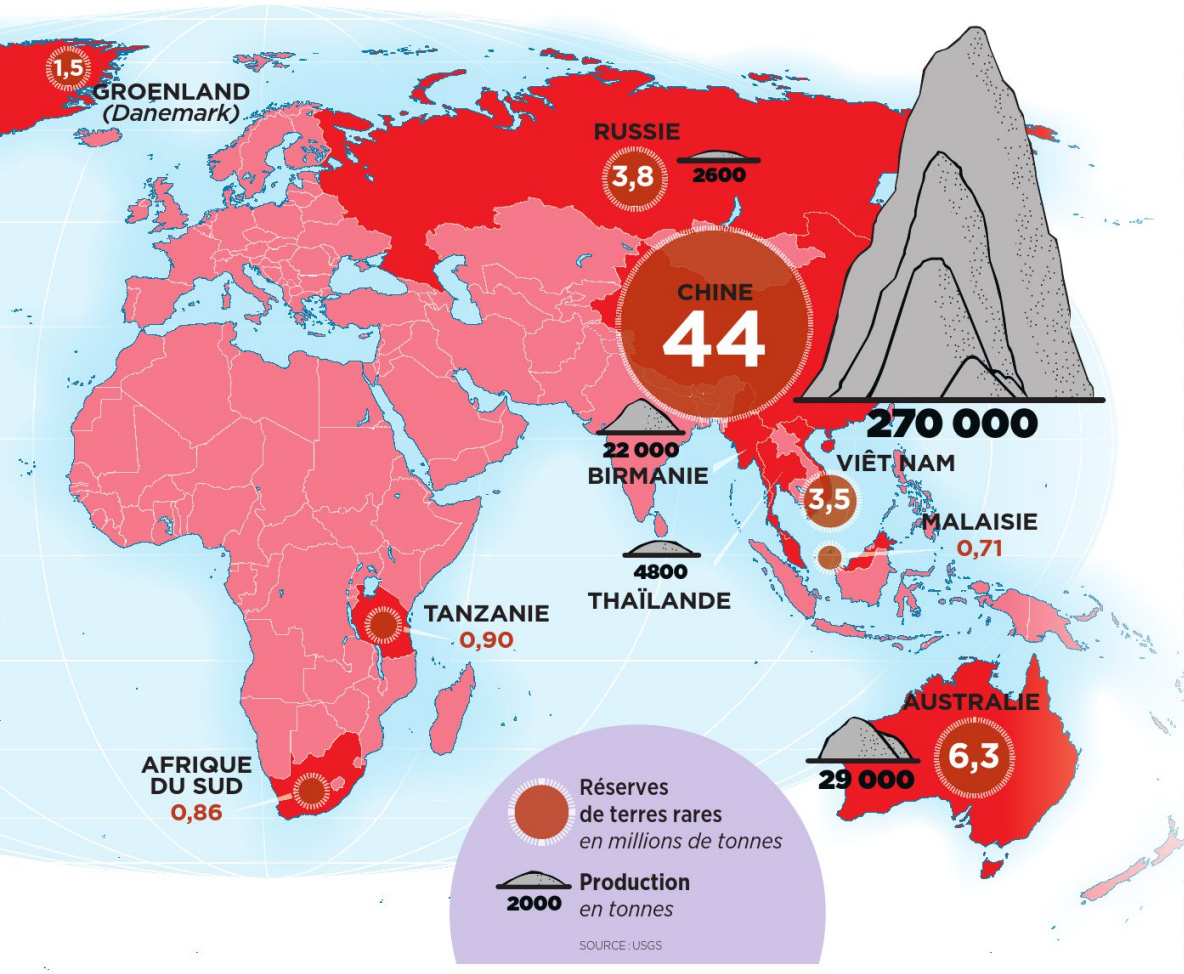


À l'heure où l'Europe cherche à réduire sa dépendance à la Chine pour les matériaux stratégiques, les terres rares sont devenues un enjeu géopolitique majeur. Indispensables aux aimants des éoliennes, aux batteries des véhicules électriques ou aux systèmes de défense, ces métaux concentrent aujourd'hui toutes les attentions. Pourtant, contrairement à ce que leur nom laisse croire, les terres rares ne sont ni des « terres » ni véritablement « rares ». *« La terminologie historique "terres rares" est européenne,* explique Nicolas Charles, géologue au Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). *Les chimistes qui ont découvert ces éléments pour la première fois les ont appelés "terres" parce que c'était un peu pulvérulent et assez sombre. »* En réalité, ce sont des métaux. Le premier identifié fut l'yttrium, en 1794. Le chimiste finlandais Johan Gadolin l'avait isolé à partir d'un minéral trouvé dans la carrière d'Ytterby, en Suède — un lieu qui a donné leur nom à plusieurs terres rares découvertes par la suite (terbium, erbium, ytterbium). *« L'origine du nom des terres rares illustre leur histoire géologique,* souligne Catherine Chauvel, géochimiste à l'Institut de physique du globe. *Lanthane, cérium, néodyme, praséodyme ou samarium : ces dénominations, qui peuvent sembler surprenantes, sont en effet souvent liées au lieu de découverte du minéral dans lequel les éléments ont été identifiés. Beaucoup d'entre eux ont été trouvés il y a plus d'un siècle. À cette époque, ils n'avaient pas d'applications technologiques majeures. »*

Les terres rares lourdes sont les plus recherchées

Le dernier de ces éléments, le prométhium, a été identifié parmi des produits de fission nucléaire en 1945 ; contrairement aux autres, il n'existe pratiquement pas à l'état naturel sur Terre. *« En 150 ans d'avancées des connaissances, les chimistes se sont aperçus que ce qu'ils considéraient initialement comme un seul élément, parce qu'il n'y avait pas encore le savoir et la technologie pour les séparer, correspondait à 15 éléments formant la famille des lanthanides »*, note Nicolas Charles. On leur associe le scandium et l'yttrium, que l'on trouve dans les mêmes gisements que les lanthanides et qui présentent des propriétés chimiques similaires.

Dans la croûte terrestre, les terres rares sont aussi abondantes en moyenne que des métaux de la vie quotidienne comme le zinc, le cuivre ou le plomb. Le cérium et le néodyme sont même plus courants que le cuivre pour le premier et l'or pour le second. Cependant, *« à l'état naturel, on les trouve généralement à l'état de trace, c'est-à-dire dans des concentrations*



◀ Les réserves mondiales de terres rares et leur production en 2025. La Chine concentre à elle seule la moitié de ces réserves.

85
millions de tonnes
L'estimation en 2026 des réserves primaires mondiales en oxydes de terres rares.

70 % de l'extraction et 90 % du raffinage
sont réalisés en Chine.

390 000 tonnes
d'oxydes de terres rares ont été extraites en 2024 dans le monde.

1/3
de la consommation mondiale de terres rares sert à la fabrication d'aimants permanents.

SOURCES : EXPERTISE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE SUR LES TERRES RARES (CNRS) ; SYNTHÈSE SUR LES RESSOURCES EN TERRES RARES EN EUROPE ET AU GROENLAND (NICOLAS CHARLES ET AL.).

inférieures à 1 %, remarque Catherine Chauvel. *Elles sont présentes un peu partout dans la croûte terrestre, mais toujours en faibles proportions — plus ou moins selon les roches, sans jamais être abondantes.* » La principale difficulté consiste donc à localiser des minéraux suffisamment riches en terres rares pour que leur extraction soit techniquement et économiquement viables.

Cet ensemble d'éléments chimiques forme un groupe très cohérent, aux propriétés extrêmement proches les unes des autres. *« Les différences entre eux sont subtiles,* note Catherine Chauvel*: les premiers de la série sont plus gros que les derniers de la série, un phénomène appelé contraction des lanthanides. On distingue ainsi les terres rares légères et les lourdes.* » Cette classification repose sur l'augmentation progressive de leur masse atomique d'un élément à l'autre, qui détermine leurs utilisations. Les terres rares légères, plus communes, sont employées pour fabriquer les alliages métalliques et les catalyseurs, tandis que les terres rares lourdes se retrouvent dans les lasers, les écrans LED, les équipements médicaux, etc. *« Les terres rares lourdes ont des propriétés physico-chimiques extrêmement recherchées,* souligne Nicolas Charles. *Par exemple, le dysprosium est utilisé dans les aimants permanents, souvent couplé au néodyme ou autres. Économiquement, les terres rares lourdes sont beaucoup plus intéressantes à exploiter car elles offrent plus de débouchés et de valeurs ajoutées dans le monde industriel.* »

IPGP

« Un inconvénient des terres rares est la présence fréquente d'un élément radioactif qui complique leur traitement »

Catherine Chauvel, géochimiste à l'Institut de physique du globe

Comme tous les éléments chimiques lourds, les terres rares se sont formées avant la naissance de la Terre, lors d'explosions d'étoiles massives ou de collisions d'étoiles à neutrons. Ces processus ont synthétisé les éléments lourds qui ont ensuite été intégrés au nuage de gaz et de poussières ayant formé le Système solaire, il y a environ 4,6 milliards d'années. Mais pourquoi y en a-t-il plus à certains endroits ? La réponse tient au mode de formation des roches. *« Pour ce qui est des roches volcaniques, tout dépend du taux de fusion du manteau au moment de leur formation,* détaille Catherine Chauvel. *Les terres rares n'aiment pas se mettre dans les minéraux et préfèrent passer dans le liquide issu de la fusion. Si celle-ci est faible, le liquide produit sera relativement concentré en terres rares. En revanche, si la fusion est plus importante, ces éléments seront dilués dans un volume de magma plus grand.* » Le premier mécanisme d'enrichissement en terres rares correspond donc aux roches issues de faibles taux de fusion. Celles qui sont particulièrement ciblées pour l'exploration minière sont les roches très alcalines et les carbonatites, issues justement de ces conditions spécifiques. *« Une fois le magma formé, il remonte vers la surface et cristallise,* poursuit Catherine Chauvel. *À ce stade, les terres rares vont aller là où elles peuvent. Comme elles renâclent à s'insérer dans les minéraux, elles se concentrent en général dans ceux qui se forment en fin de cristallisation* », notamment les bastnaésite, monazite et xénotime. *« Un inconvénient de l'exploitation des terres rares contenues dans la monazite est la présence fréquente de thorium, un élément radioactif, qui complique leur traitement* », souligne la géochimiste.

Les gisements issus de l'altération des roches

Il existe un second grand type de gisements de terres rares, issus d'un processus d'altération des roches en surface. Dans les régions tropicales, par exemple, les roches exposées à l'air libre subissent une altération intense sous l'effet de l'eau et des pluies abondantes. Ce processus entraîne le lessivage d'une grande partie des éléments solubles. Les minéraux les plus fragiles sont progressivement dissous et emportés, tandis que ceux qui résistent davantage, notamment certains minéraux contenant des terres rares, restent en place. C'est un mécanisme de concentration par élimination de tout le reste. *« Sur les plus de 6000 espèces minérales reconnues dans le monde, environ 250 sont enrichies en terres rares. Mais on ne sait en traiter qu'une dizaine au maximum, ce qui explique pourquoi les gisements sont finalement peu nombreux* » conclut Nicolas Charles. ■ **S. R.**

EXPLORATION

Des fonds marins très convoités

En février, le navire scientifique japonais *Chikyu* a rapporté une moisson inédite de sédiments riches en terres rares, prélevés dans le Pacifique, au large de l'île de Minami-Torishima. Les résultats de la mission suggèrent la présence de plus de 16 millions de tonnes de terres rares dans la zone, soit l'équivalent de plusieurs siècles de consommation mondiale d'aimants, de téléphones, de voitures électriques, de lasers, etc. Les fonds marins apparaissent aujourd'hui comme une nouvelle source d'approvisionnement en terres rares, au travers des nodules polymétalliques, ces agglomérations de minéraux, qui pourraient contenir entre 2 et 12 millions de tonnes de ces éléments. Quant aux sédiments profonds, selon une étude coréenne publiée en 2024 dans la revue *Marine Georesources & Geotechnology*, on pourrait extraire environ 450 millions de tonnes d'oxydes de terres rares en draguant une couche de 1 mètre sur 1,1 million de km^2 du Pacifique à plus de 4 km de profondeur ! La France, qui possède le second plus vaste domaine maritime au monde, offre potentiellement un accès à ces ressources *offshore*. Mais les méthodes minières envisagées pourraient perturber durablement des écosystèmes encore mal connus, abritant de nombreuses espèces endémiques. À ce jour, il est impossible de prédire si les fonds marins pourraient revenir à l'équilibre après une exploitation humaine.

YUICHI YAMAZAKI / AFP

Le navire japonais « Chikyu » au retour de sa mission de prélèvement de terres rares dans le Pacifique.

CHIMIE

Les superpouvoirs des terres rares

Plus d'un siècle après leur découverte, ces 17 métaux longtemps perçus comme déroutants et inutiles sont devenus indispensables aux nouvelles technologies. Car ils recèlent des propriétés magnétiques, optiques ou électroniques hors du commun.

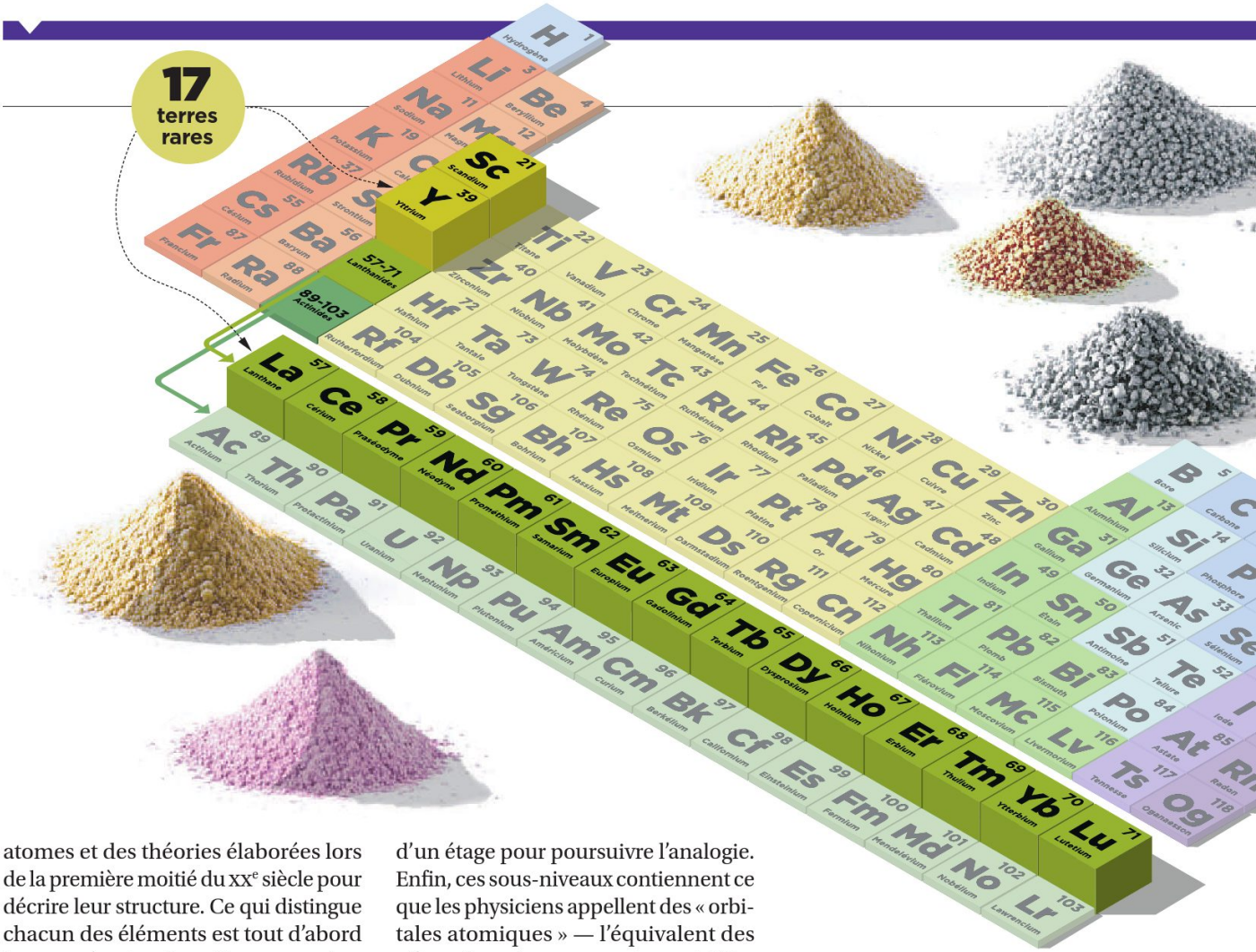
Les orbitales atomiques de la couche électronique 4f ont des géométries très complexes (modélisation).

DR MARK J. WINTER / SPL / SUCRE SALÉ

À la fin du XIXe siècle, alors que les découvertes de nouvelles terres rares se multipliaient, cette famille d'éléments posait un casse-tête aux chimistes. Pour le Russe Dimitri Mendeleïev, qui venait de classifier toutes les substances élémentaires connues selon leur masse atomique et leur comportement, elle faisait un peu figure d'anomalie. Les propriétés chimiques des terres rares semblaient en effet indiscernables, comme s'il s'agissait de copies les unes des autres, dont l'intérêt serait par conséquent limité. Dimitri Mendeleïev avait de fait toutes les peines du monde à les intégrer dans son fameux tableau périodique, leur place précise devant être encore clarifiée. Très difficiles à extraire et à séparer de leurs minerais rocheux, elles représentaient par ailleurs un véritable cauchemar expérimental. Il fallut ainsi près de cinquante ans pour réaliser, en 1885, que le « didyme » était en réalité un mélange de deux terres rares — le néodyme et le praséodyme. Pour Josef Maria Eder, membre de l'Académie autrichienne des sciences et l'un des pionniers des techniques photographiques au tournant du XXe siècle, les terres rares ne servaient ainsi à rien d'autre… qu'à confondre les chimistes !

Au cœur de la structure atomique

Ces éléments jadis jugés déroutants et inutiles sont pourtant considérés aujourd'hui comme stratégiques — essentiels pour une multitude d'applications. Quels « superpouvoirs » avaient ainsi échappé aux premiers découvreurs des terres rares ? Qu'est-ce qui les rend désormais si indispensables ? Pour comprendre, il faut plonger au cœur des



atomes et des théories élaborées lors de la première moitié du XXe siècle pour décrire leur structure. Ce qui distingue chacun des éléments est tout d'abord leur numéro atomique. Il correspond au nombre de protons — particules portant une charge électrique positive — contenus dans leur noyau, autour duquel orbite un nombre équivalent d'électrons chargés négativement. L'hydrogène est composé ainsi d'un proton et d'un électron ; tandis que l'uranium, élément naturel le plus lourd, possède 92 protons et autant d'électrons. *« L'agencement des électrons répond toutefois à des exigences bien précises, régies par les lois de la mécanique quantique, qui minimisent l'énergie des atomes et assurent leur stabilité »*, explique Thibaut Devillers, maître de conférences à l'université Grenoble Alpes. Les électrons s'organisent ainsi en couches de plus en plus énergétiques et distantes du noyau, un peu comme les étages d'un immeuble — la première pouvant accueillir deux électrons, huit pour la seconde, 18 pour la troisième, etc. Ce n'est pas tout. Car chaque couche comporte un nombre croissant de sous-niveaux, à l'instar des appartements d'un étage pour poursuivre l'analogie. Enfin, ces sous-niveaux contiennent ce que les physiciens appellent des « orbitales atomiques » — l'équivalent des pièces dans chaque appartement. Elles correspondent, du point de vue de la mécanique quantique, aux régions où les probabilités de trouver un électron sont les plus grandes : en forme de sphère pour les plus simples (les « orbitales s ») mais aussi d'haltère (« orbitales p »), de trèfle (« orbitales d »), etc.

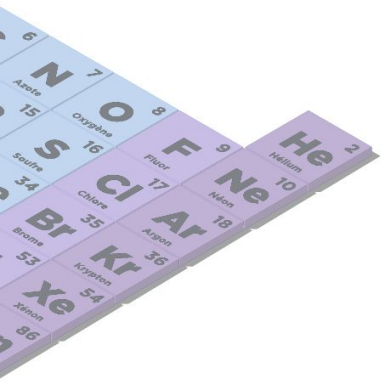
Une sous-couche électronique à nulle autre pareille

« Ces architectures permettent de comprendre certaines des propriétés si confondantes et à présent si recherchées des terres rares », souligne Thibaut Devillers. Constituée des éléments dont le numéro atomique est compris entre 57 et 71 (soit du lanthane au lutécium, auxquels on ajoute parfois, en raison de leurs similitudes chimiques, l'yttrium et le scandium), cette série possède une sous-couche électronique à nulle autre pareille, notée « 4f ». *« Les électrons qui la remplissent peu à peu — 14 au maximum — ont des propriétés tout à fait particulières »*, précise Thibaut Devillers. Leurs orbitales ont des géométries très complexes, comprenant notamment un grand nombre de lobes. Surtout, au lieu d'être situées en périphérie comme pour les autres atomes, elles sont cachées à proximité du noyau ! *« Tout se passe comme si ces particules se trouvaient dans les régions externes au niveau énergétique tout en restant enfouies sous un cortège d'électrons »*, s'émerveille Kevin Bernot, chercheur à l'Institut des sciences chimiques de Rennes.

Avec plusieurs conséquences. La première est que les électrons périphériques — ceux qui interagissent le plus facilement avec les substances environnantes et confèrent aux atomes leur réactivité — sont les mêmes d'une terre rare à l'autre. C'est pour cette raison que ces éléments ont des comportements chimiques aussi similaires et sont si difficiles à séparer ! Dans la classification de Mendeleïev, elles apparaissent d'ailleurs *« sous la*

La classification de Mendeleïev

Dans le tableau périodique, les terres rares correspondent au groupe d'éléments dont les numéros atomiques sont compris entre 57 (lanthane) et 71 (lutécium), auxquels on ajoute parfois le scandium et l'yttrium.



forme d'une ligne additionnelle, qui se branche au lanthane, donnant au tableau périodique une allure tridimensionnelle », observe Kevin Bernot.

Des propriétés optiques hors du commun

Or, en examinant attentivement cette série, les scientifiques ont découvert que les électrons 4f conféraient aux terres rares des capacités exceptionnelles. Cette sous-couche contient en effet un ou plusieurs électrons solitaires, écrantés des perturbations extérieures, qui ressentent fortement le champ électrique du noyau. Chaque atome se comporte ainsi comme un aimant microscopique de forte intensité, extrêmement stable de surcroît. Car les interactions qui s'établissent entre le mouvement de rotation des électrons 4f autour du noyau et autour d'eux-mêmes (une propriété quantique appelée « spin ») verrouillent l'orientation magnétique dans une direction privilégiée de l'espace. Ce phénomène est par ailleurs amplifié par les interactions avec le champ électrique des atomes voisins. L'ensemble des sources magnétiques pourront ainsi s'aligner et il faudra énormément d'énergie pour briser cette organisation. *« Combinés à des métaux comme le cobalt ou le fer, certaines terres rares constituent ainsi de fabuleux aimants permanents, très résistants à la démagnétisation* », indique Thibaut Devillers.

Développés dans les années 1960, les aimants composés de samarium et de cobalt étaient déjà dix fois plus performants que ceux à base de ferrites. Ils seront ensuite détrônés, à partir des années 1980, par des matériaux contenant du néodyme, du fer et du bore, deux fois plus efficaces. *« C'est désormais l'aimant par excellence* », assure Thibaut Devillers. Il permet de fabriquer des moteurs très performants et générer de l'énergie avec une grande efficacité. On les trouve actuellement dans presque tous les véhicules électriques, les éoliennes marines, les disques durs des ordinateurs, etc.

C'est grâce aux électrons 4f que les terres rares possèdent aussi des propriétés optiques hors du commun. Parce qu'ils sont enfouis au cœur des atomes, bien protégés de l'environnement extérieur, ces éléments absorbent puis réémettent les rayonnements lumineux de manière extrêmement fine : bien mieux que le chrome, le cuivre ou le manganèse et même les pigments organiques. *« Le terbium produit un vert intense dans la plupart des environnements chimiques* », signale Kevin Bernot. Et puisque les terres rares possèdent des propriétés chimiques très similaires, *« elles peuvent être combinées à loisir pour produire une variété de teintes* », poursuit le chercheur, en ajoutant des doses d'europium de couleur rouge ou de thulium bleu clair, par exemple. Les signatures spectrales sont si spécifiques qu'elles sont utilisées pour lutter contre la contrefaçon et marquer les billets de banque ! Mais les applications, là encore, sont légion : pour les téléviseurs, lasers, fibres optiques, LED ou encore l'imagerie médicale.

Une grande affinité avec l'oxygène

Enfin, une troisième propriété remarquable des terres rares concerne leur affinité avec l'oxygène. Elle vient du fait que leurs électrons externes, faiblement liés aux atomes, sont facilement arrachés. Les espèces ioniques qui en résultent, dotées la plupart du temps de trois charges positives, forment alors avec l'oxygène (très électronégatif) des interactions très fortes, donc des composés particulièrement stables. Cette spécificité est mise à profit pour polir tout type de verre, des écrans de smartphones aux miroirs des télescopes. *« En se fixant sur l'oxygène de la silice, les oxydes de terres rares — principalement de cérium — arrachent des couches très fines de matière jusqu'à obtenir des surfaces extrêmement lisses* », détaille Kevin Bernot.

Mais le cérium a un autre atout majeur : il peut céder trois, mais aussi quatre électrons de façon rapide et réversible, ces configurations étant stabilisées par la sous-couche 4f. En passant facilement d'une forme ionique à l'autre, les oxydes de cérium jouent ainsi un rôle crucial dans les pots catalytiques des voitures : ils stockent ou, au contraire, libèrent de l'oxygène pour transformer le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote et autres hydrocarbures imbrûlés. ■ **F. D.**

THIBAUT DEVILLERS

« Combinés à des métaux comme le cobalt ou le fer, certaines terres rares constituent de fabuleux aimants permanents »

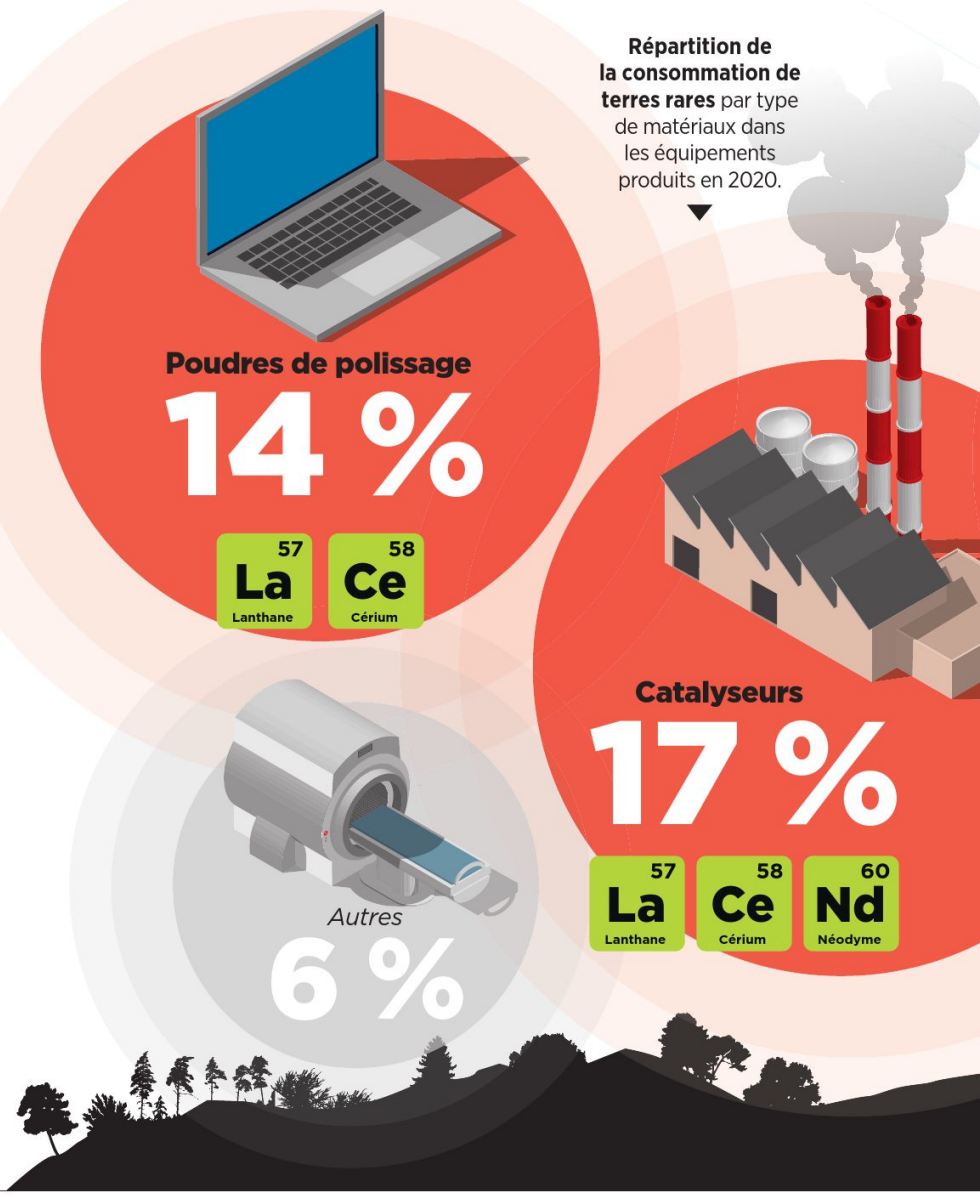
Thibaut Devillers, maître de conférences à l'université Grenoble Alpes

APPLICATIONS

Le moteur de la transition écologique

Néodyme, dysprosium, samarium… Ces métaux sont utilisés massivement dans des secteurs industriels de pointe : électronique, imagerie, éolienne et voiture électrique.

Les terres rares se retrouvent à peu près partout dans notre quotidien, même si ce n'est parfois qu'à l'état de traces. Mais leurs propriétés remarquables (*lire p. 35*) les rendent indispensables à de nombreuses technologies. *« Le premier débouché est celui des aimants permanents : cela représente un gros tiers de la consommation globale de terres rares »*, explique Clément Levard, directeur de recherche au CNRS et copilote de l'expertise collective sur les terres rares publiée en novembre 2025. Ces aimants au néodyme et au dysprosium se retrouvent dans les moteurs électriques des voitures ou dans les éoliennes *offshore*. *« Ce sont des éléments clés de la transition énergétique : on s'attend donc à une forte augmentation de la demande, allant jusqu'à 50 %, d'ici à 2050. »*
D'autres usages, moins visibles, représentent néanmoins des volumes importants. Les terres rares entrent ainsi dans les catalyseurs utilisés pour le craquage du pétrole ou pour traiter les gaz d'échappement. *« Elles sont aussi présentes dans les poudres de polissage à base d'oxyde de cérium, indispensables pour obtenir des surfaces extrêmement lisses dans les verres optiques, les écrans ou les plaquettes de silicium au cœur des circuits intégrés »*, ajoute le chercheur. D'autres applications complètent le tableau : matériaux luminescents pour les LED, agents de contraste pour IRM, verres et céramiques ou alliages métalliques utilisés dans l'aéronautique. ■ **F. N.**



Matériaux luminescents

2 %

57 La Lanthane
58 Ce Cérium
63 Eu Europium
64 Gd Gadolinium
65 Tb Terbium

Aimants permanents

37 %

59 Pr Praséodyme
60 Nd Néodyme
62 Sm Samarium
66 Dy Dysprosium

Alliages métalliques

8 %

57 La Lanthane
58 Ce Cérium
59 Pr Praséodyme
60 Nd Néodyme
64 Gd Gadolinium
67 Ho Holmium
68 Er Erbium
39 Y Yttrium

Électrodes *(Batteries NiMH)*

5 %

57 La Lanthane
58 Ce Cérium
59 Pr Praséodyme
60 Nd Néodyme

Verres et céramiques

11 %

57 La Lanthane
58 Ce Cérium
60 Nd Néodyme
62 Sm Samarium
64 Gd Gadolinium
67 Ho Holmium
68 Er Erbium
70 Yb Ytterbium
71 Lu Lutécium
39 Y Yttrium

SOURCE : CNRS, SYNTHÈSE DE L'EXPERTISE SCIENTIFIQUE COLLECTIVE TERRES RARES, 2025

EXTRACTION

Un coût environnemental exorbitant

La Chine exploite depuis trente ans ses vastes ressources en terres rares. Une activité minière ravageuse pour l'environnement où la pollution des eaux et de l'air dépasse largement le seul site d'extraction.

La mine de Bayan Obo, en Mongolie-Intérieure, est la plus grande au monde pour l'extraction de terres rares, fournissant une grande partie de l'approvisionnement mondial.

Des destructions profondes, une restauration lente et incertaine. Dans une étude au long cours sur les impacts de l'extraction des terres rares publiée en juin 2023 dans la revue scientifique *Sustainability*, les chercheurs de l'université des sciences et technologies du Ganzhou (Chine) constatent que cette exploitation minière est ravageuse pour l'environnement. Le site étudié, la mine de Lingbei, s'étend au sein des collines d'argile rouge du sud de la Chine, dans un écosystème tropical d'une grande biodiversité. L'extraction y a démarré dans les années 1990, quand Pékin a décidé de mettre le paquet sur les terres rares, à une époque où leurs usages étaient encore peu développés. L'étude s'arrête plus de trente ans plus tard. Elle révèle des dégâts qui mettront beaucoup de temps à être réparés.

Les chercheurs ont utilisé l'imagerie satellitaire et la télédétection pour couvrir une zone de 100 km^2 englobant le site minier et les zones riveraines. Au cours des trente années d'extraction, ils ont ainsi documenté l'avancée de cette mine à ciel ouvert. Ils ont croisé ces observations satellitaires aux constats effectués au sol grâce à 17 indicateurs écologiques. Ils ont pu ainsi déterminer que la pollution des eaux et de l'air dépassait largement le seul site d'extraction. Les principales atteintes aux milieux naturels provenaient des lixiviations (passage de l'eau dans le sol qui se charge ainsi de polluants) des lacs de retenue des eaux de traitement du minerai ainsi que de l'érosion éolienne et hydrique des terrils de déchets miniers. À partir de 2012, les gestionnaires du site ont entamé des travaux de réhabilitation, observés avec précision par les écologues. Les replantations d'espèces végétales, les réhabilitations d'habitats ont donné des résultats très mitigés. Les chercheurs en concluent qu'un retour à un état le plus proche possible de l'état écologique antérieur, mettra plusieurs décennies. La pollution profonde des sols en est la principale raison.

Toute activité minière est polluante. Celle des terres rares ne fait pas exception. Selon l'expertise collective menée par le CNRS et publiée en 2025, elle n'est pas la pire. Si les impacts sont bien plus élevés que ceux induits par les métaux les plus utilisés (fer, aluminium, cuivre, nickel, zinc), ils sont cependant moindres que ceux provoqués par les métaux précieux comme l'or, le palladium, le platine, le rhodium ou encore l'argent. Les principaux dégâts sont provoqués par les nombreux produits chimiques nécessaires pour séparer les différents éléments des terres rares. Une opération qui, en Chine en général, et à Lingbei en particulier, se fait *in situ* par projection des substances directement sur la roche. Les caractéristiques de l'exploitation de Lingbei ne sont pas connues, l'étude ne

L'extraction minière provoque des rejets très importants de poussières et de polluants dans l'air et dans les eaux avec des niveaux 200 fois supérieurs à la normale

BERT VAN DIJK/GETTY IMAGES

s'intéressant qu'aux effets constatés sur l'environnement. Mais le CNRS donne l'exemple de la mine de Bayan Obo, en Mongolie-Intérieure, où une seule étape de traitement de 50 tonnes de minerai pour obtenir une tonne de terres rares nécessite 4,41 tonnes d'acide sulfurique, 12,32 t de chlorure de sodium, 1,64 t d'hydroxyde de sodium, 1,17 t d'acide chlorhydrique et 190 t d'eau. Ces valeurs ne s'appliquent qu'à ce site, car chaque composition géologique possède des teneurs différentes des 17 terres rares, obligeant à adapter à chaque fois les traitements nécessaires.

L'extraction minière provoque donc des rejets très importants de poussières et de polluants dans l'air et dans les eaux avec des niveaux d'éléments de terres rares 200 fois supérieurs à la normale, selon une étude chinoise de 2021. Ces résidus s'accumulent sur les sols et, surtout, sur les végétaux, dont ceux consommés par les humains. Il est très difficile de connaître le risque encouru, les éléments étant plus ou moins toxiques pour les organismes. Selon l'expertise du CNRS, ces éléments peuvent provoquer des dommages cellulaires, du stress oxydatif et divers troubles pulmonaires et rénaux. À ce jour, les travaux menés sur l'état de santé des populations riveraines sont quasi inexistants.

Une course à l'exploitation dans toutes les régions du monde

S'ajoute par ailleurs un risque radioactif. Les éléments comme l'uranium et le thorium sont chimiquement associés aux terres rares. *« Les processus d'extraction des terres rares peuvent produire, selon la nature du gisement, jusqu'à environ 1,4 tonne de déchets radioactifs pour une tonne d'oxyde de terres rares »*, affirme le CNRS.

La Chine s'est peu souciée, jusque très récemment, des effets environnementaux de l'extraction minière. On a pu ainsi mesurer les effets du « laisser faire » et en conclure que des précautions devaient être prises tant pour la nature que pour la santé des humains. Mais aujourd'hui, le rôle des terres rares dans les technologies est tel, et la prééminence de la Chine sur le secteur pèse si lourd, que chaque région du monde pousse pour exploiter ses propres gisements. *« En Europe, on se retrouve ainsi avec un droit très contradictoire qui est censé s'articuler,* expose Pascale Ricard, coordinatrice de l'expertise du CNRS. *D'un côté, l'Union européenne encourage l'exploitation des matières critiques pour être indépendant et, de l'autre, les règlements environnementaux imposent la protection de l'environnement et de la santé humaine.* »

Les prochains sites de terres rares (le premier en Europe est en développement à Kiruna, en Suède) devront donc déployer toutes les techniques disponibles pour éviter et réduire les émissions dans l'air et dans l'eau de matériaux qu'impose le traitement de milliers de tonnes de roches pour extraire moins de 1 % d'éléments utilisables. Une gageure. ■ **L. C.**

VALORISATION

Le recyclage, l'autre mine d'or des terres rares

Le recyclage apparaît comme un levier d'approvisionnement majeur face à une demande en forte hausse. Mais aujourd'hui, moins de 1 % des terres rares sont recyclées dans le monde. Zoom sur deux entreprises françaises qui refabriquent des aimants à partir d'anciens appareils.

Avec peu de gisements naturels exploitables, l'Europe avance à découvert. En Chine, les mines ne suffisent plus à suivre une demande mondiale qui croît d'environ 13 % par an. Dans ce contexte, le recyclage apparaît comme un levier d'approvisionnement majeur. Mais aujourd'hui, moins de 1 % des terres rares sont recyclées dans le monde. Ce chiffre s'explique à plusieurs titres. D'abord, l'histoire de la filière est récente. *« Il y a trente ans, la demande en terres rares était très inférieure. Et à l'époque, on ne recyclait que les pondéreux — cuivre, aluminium, verre — faciles à collecter et à valoriser »*, rappelle Solène Touzé, ingénieure au Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). La crise sino-japonaise de 2010 a mis en lumière la dépendance mondiale à la Chine et déclenché un intérêt scientifique massif pour le recyclage. Mais plusieurs problématiques ont émergé. Certes, les produits en fin de vie constituent une source secondaire d'importance — une « mine urbaine ». Mais l'accès au gisement demeure un verrou.

« Il y a une vingtaine d'années, pour exister dans le monde des terres rares, il fallait être capable de les préparer pour des applications variées, allant du polissage du verre aux additifs pour les pigments, explique Frédéric Carencotte, fondateur de Carester, entreprise française très avancée dans le recyclage des terres rares, tout comme Solvay et MagREEsource. *Mais depuis, le besoin en aimants permanents a connu une très forte croissance et représente aujourd'hui plus de 90 % de la chaîne de valeur.* » Les terres rares magnétiques — néodyme, praséodyme, dysprosium, terbium, samarium — sont donc devenues stratégiques. Mais elles sont disséminées dans des objets très différents : il faut une tonne de téléphones pour récupérer 3,3 kg de terres rares. À l'inverse, les aimants d'éoliennes — entre 650 kg et une tonne — constituent un gisement concentré, mais ils n'arriveront massivement en fin de vie que dans vingt ans.

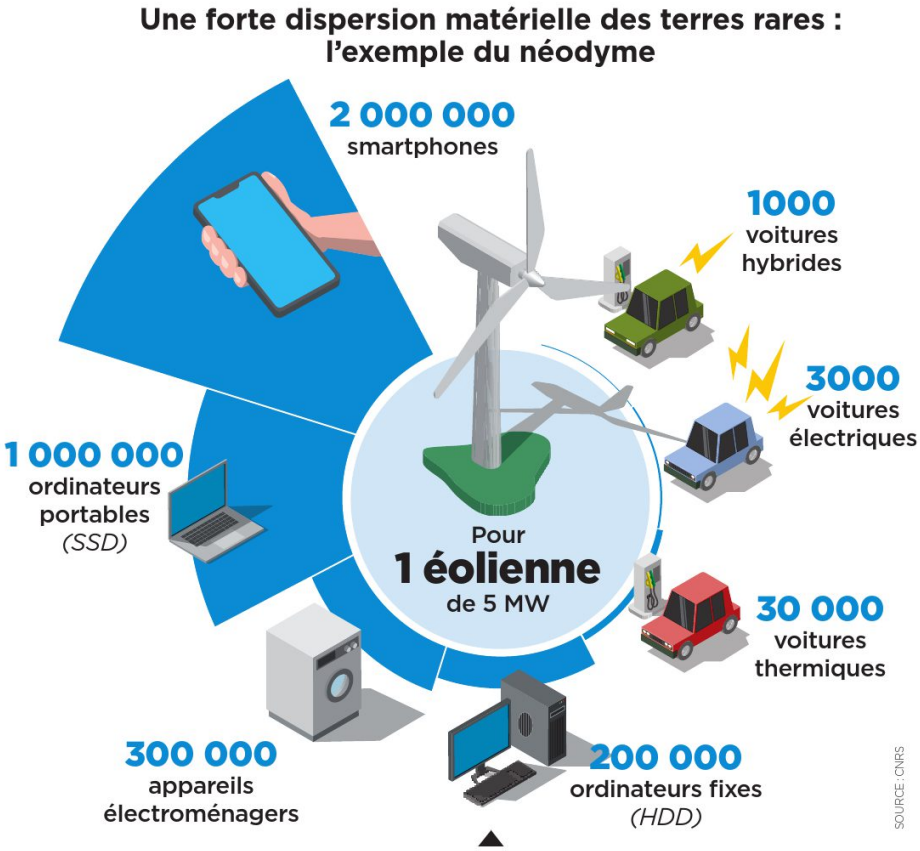
Une relocalisation de la production en France

« Plus d'une centaine d'applications existent : moteurs électriques, électronique, éoliennes, défense, IRM, enceintes…, souligne Érick Petit, fondateur de MagREEsource. *Tous ces marchés sont aussi une source de déchets, mais les temps d'immobilisation*

STRATÉGIE

Le potentiel des résidus industriels

Certaines industries génèrent des résidus qui concentrent naturellement des terres rares : cendres de charbon, résidus de bauxite issus de la production d'aluminium, ou phosphogypse provenant de l'industrie des phosphates. Produits en quantités massives et déjà extraits du sol, ils constituent des sources secondaires stratégiques. Leur teneur en terres rares reste faible (0,04 à 0,25 %), mais les volumes accumulés sont considérables : les cendres de charbon contiendraient environ 320 000 tonnes d'éléments de terres rares, et les résidus de bauxite près de 150 000 t. Certains renferment aussi du scandium, un métal très coûteux, susceptible d'améliorer la rentabilité des procédés. Mais les stocks européens sont encore mal quantifiés.



Nombre d'objets à recycler pour obtenir la même quantité de néodyme que dans un aimant d'éolienne de 5 millions de watts.

dépendent de la durée de vie moyenne : 12 à 15 ans pour une voiture, 25 ans pour une éolienne, 20 ans pour une IRM, moins de 5 ans pour certains produits électroniques. » Et encore faut-il identifier où sont les aimants et pouvoir les démanteler facilement. Résultat : les volumes disponibles restent faibles.

« *Voilà pourquoi on a plafonné à 1 % de recyclage,* conclut Stéphane Pellet Rostaing, directeur de l'Institut de chimie séparative de Marcoule. *Ce pourcentage correspond surtout au recyclage des rebuts industriels. Et les rares filières existantes pour recycler les terres rares contenues dans les équipements en fin de vie ont parfois été rendues obsolètes par les évolutions technologiques, comme le recyclage des poudres de phosphore des lampes basse consommation, balayé par les LED.* »

Ces problématiques n'ont pas empêché chercheurs et industriels de mettre au point des procédés efficaces et rentables. Une fois les aimants extraits, deux grandes approches coexistent. La première, dite voie courte, consiste à refabriquer un aimant à partir d'un autre, sans repasser par la séparation élémentaire. C'est celle que développe la start-up française MagREEsource, issue du CNRS, qui ambitionne de devenir leader européen dans son domaine. « *Nous avons développé trois technologies,* précise Érick Petit. *La première boucle courte utilise l'hydrogène : nous prenons des déchets d'aimants et les intégrons dans un réacteur. Les alliages absorbent facilement les gaz. L'hydrogène se place au niveau des joints de grains riches en terres rares. Ce phénomène fait gonfler la matière jusqu'à explosion, nous donnant de la poudre. On parle de décrépitation.* » Cette poudre est ensuite compactée puis chauffée pour souder les grains de poudre afin de refabriquer un aimant aux propriétés robustes. Ce procédé réduit l'empreinte carbone de 91 % par rapport aux aimants issus de l'extraction minière, tout en relocalisant la production sur le sol français. Pour connaître la composition exacte de chaque aimant recyclé, MagREEsource dispose d'un important laboratoire de caractérisation : « *Nous contrôlons 100 % de l'entrant — environ 60 tonnes de déchets. Tous sont caractérisés pour connaître composition, microstructure et grade. Nous répartissons dans nos stocks et faisons des mélanges pour obtenir le bon mélange final. Cette connaissance fine des flux est devenue un préalable indispensable.* »

Une entrée en production à Lacq d'ici à 2027

Pour couvrir une gamme complète vers la très haute performance et anticiper les futures compositions des aimants, l'entreprise a aussi développé deux autres boucles. La boucle « fusion » consiste à faire fondre les déchets avant décrépitation pour travailler la microstructure et améliorer la performance. « *Ici on est capable de mélanger beaucoup plus de déchets pour obtenir une composition idéale* », souligne Érick Petit. Enfin, elle développe un pilote pour une troisième boucle courte, avec ajout de métallisation. « *L'idée, c'est d'aller se fournir en oxydes de terres rares recyclés pour en ajouter à nos mélanges afin de fabriquer des aimants performants en récupérant n'importe quel déchet contenant des aimants.* »

Pour cette troisième boucle, MagREEsource s'appuiera donc sur la seconde approche : la voie longue. Cette technologie constitue le cœur de métier de Carester. Ici les aimants sont décortiqués pour séparer chimiquement chaque terre rare et produire des oxydes d'une pureté identique à celle des métaux sortis de mine. Elle combine pyrométallurgie, hydrométallurgie, filtration et

séchage. Si ce procédé, contrairement à la voie courte, est similaire à celui utilisé en sortie de mine, le recyclage par voie longue reste beaucoup plus vertueux. Car la concentration minimale de terres rares dans un aimant est de 30 %, quand dans une mine on parle de 500 g par tonne.

Aujourd'hui, MagREEsource comme Carester finalisent des projets d'usine pensés pour réduire au maximum leurs impacts : recyclage intégral de l'eau, captation et recyclage du CO_2, optimisation énergétique, zéro effluent rejeté. Caremag, l'usine de Carester à Lacq (Pyrénées-Atlantiques), devrait entrer en production d'ici à 2027. Objectif : produire chaque année 800 tonnes d'oxyde de néodyme, 500 t d'oxyde de dysprosium et 100 t d'oxyde de terbium. Des objectifs très ambitieux : *« Avec 800 t d'oxyde de néodyme par exemple, il est possible de reproduire 2700 éoliennes* offshore, *sachant que notre parc est actuellement d'environ 300 éoliennes* offshore », souligne Stéphane Pellet-Rostaing. Des contrats de long terme ont déjà été signés, notamment avec des partenaires japonais et le groupe Stellantis.

Sécuriser l'approvisionnement en aimants permanents

Quant à MagREEsource, elle passera d'une production de 80 t/an à Noyarey (Isère) à une capacité de 1000 t d'aimants néodyme et 100 t d'aimants samarium en 2029, quand sa Magfactory sortira de terre. Ce qui représentera 4 % du marché des aimants néodyme en Europe et 20 % des aimants samarium. Ces projets contribueront ainsi à sécuriser l'approvisionnement en terres rares et aimants permanents sur un marché européen évalué à 25 000 t en 2026 et appelé à doubler d'ici à 2035. Alors que l'industrialisation en cours devrait accroître significativement les volumes recyclés d'ici à cinq ans, la recherche s'attache désormais à réduire l'impact environnemental des procédés, en particulier ceux de la voie longue. *« L'objectif, c'est d'utiliser moins d'eau, moins d'acides et d'éviter les solvants d'origine pétrolière,* explique Stéphane Pellet-Rostaing. *Les laboratoires explorent des acides organiques, comme l'acide acétique, capables de dissoudre sélectivement les terres rares. Ils développent aussi des extractants dits Chon (carbone, hydrogène, oxygène et azote), dépourvus de phosphore et de soufre, plus facilement dégradables.* » D'autres pistes émergent. Ainsi l'utilisation de molécules appelées hydrotropes doit améliorer les capacités de lixiviation, c'est-à-dire de dissolution chimique pour extraire les métaux d'un minerai. Avec la biolixiviation ou la biominéralisation, il s'agit de mobiliser des micro-organismes pour solubiliser ou précipiter les métaux. Ces procédés restent encore lents ou sensibles, mais leur potentiel est prometteur.

Cependant, souligne Stéphane Pellet-Rostaing, le recyclage ne peut être pensé isolément. *« Il faut réindustrialiser toute la chaîne : collecte, démantèlement, désassemblage et recyclage.* » Et, même optimisé, il ne suffira pas à couvrir une demande en croissance rapide. *« Les besoins doublent tous les cinq ans. Le recyclage ne pourra jamais tout absorber.* » Le parallèle avec le cuivre est éclairant : malgré un taux de recyclage de 53 %, le cuivre secondaire ne couvre que 20 % de la demande mondiale.

Les terres rares suivront la même logique : le recyclage est indispensable, mais il ne remplacera pas l'extraction primaire. L'objectif du CRMA (Critical raw materials act), voté en 2024 par la Commission européenne, est de couvrir 25 % des besoins européens par le recyclage. L'avenir passera donc par une combinaison : mines responsables, recyclage optimisé, valorisation des déchets industriels… et sobriété. Une équation incontournable pour sécuriser des métaux critiques largement associés à la transition énergétique. ■ **F. C.**

FRANCK ARDITO, MAGREE

À partir de déchets d'aimants réduits en poudre, la start-up MagREEsource refabrique des aimants dotés de solides propriétés.

S. PELLET-ROSTAING

« L'objectif, c'est d'utiliser moins d'eau, moins d'acides et d'éviter les solvants d'origine pétrolière »

Stéphane Pellet-Rostaing, directeur de l'Institut de chimie séparative de Marcoule (Gard)

PHILIPPE BIHOUIX
INGÉNIEUR ET AUTEUR

« Ce sera compliqué de les remplacer »

Pour limiter les terres rares dans notre consommation, il faudrait plutôt faire durer nos équipements, mais aussi réincorporer des composants encore fonctionnels dans de nouveaux produits, conseille le spécialiste.

AGNÈS D'HERBEYS /MYOP

Expert en ressources minérales, Philippe Bihouix est coauteur du roman graphique « Ressources » (Casterman, 2024).

Les terres rares sont devenues indispensables. Peut-on en restreindre l'usage ?
On peut toujours optimiser un peu : réduire la quantité de néodyme ou de dysprosium dans les aimants permanents, améliorer les alliages, chercher des substitutions. Mais il faut être lucide : si on utilise ces éléments, c'est parce qu'ils ont des propriétés très performantes. Ce sera compliqué de les remplacer.

De quels leviers dispose-t-on pour plus de sobriété ?
Il faut d'abord injecter moins de terres rares dans notre consommation : moins d'objets, moins de fonctionnalités superflues, moins d'infrastructures en doublon. Ce que j'appelle une sobriété systémique. Cela suppose de questionner l'enrichissement technologique permanent de nos objets. Une voiture, aujourd'hui, ce sont des dizaines de moteurs électriques pour régler les sièges, les rétroviseurs, etc. Des haut-parleurs à l'avant et à l'arrière. Même chose pour les écrans toujours plus grands, les objets connectés disséminés partout, jusqu'au réfrigérateur « intelligent ». Il faut exercer un discernement technologique et se poser la question de ce dont nous avons vraiment besoin, pour prioriser les usages.

Cela renvoie à des choix collectifs ?
Oui. Prenez les télécoms. Nous avons autant de réseaux que d'opérateurs ! D'un point de vue environnemental, c'est absurde. Tout est redondant, alors qu'un réseau mutualisé suffirait, comme pour l'eau. On pourrait aussi dimensionner autrement nos objets : voitures plus légères, écrans plus raisonnables. La sobriété, ce n'est pas l'austérité, c'est éviter le suréquipement systématique.

Le recyclage peut-il compenser cette inflation des usages ?
Très difficilement. Les terres rares sont très dispersées. Dans un smartphone, elles sont présentes en quantités minuscules, parfois plus diluées que dans la croûte terrestre. Les récupérer coûte cher et demande une logistique lourde. Or, aujourd'hui, les ressources coûtent trop peu. Dans un smartphone, la matière première représente 2 à 3 euros… Il n'y a donc pas de modèle économique pour le recyclage, sauf à imaginer une fiscalité sur l'extraction pour mieux rendre compte du coût environnemental de ces matériaux, et rééquilibrer un peu les choses.

Que faire alors, si le recyclage ne suffit pas ?
Il faudrait plutôt faire durer. En réparant bien sûr, mais aussi en réincorporant des composants encore fonctionnels dans de nouveaux produits. Ce qu'on appelle le *remanufacturing* (remise à neuf). Lorsque la chaudière de la maison vous lâche, vous ne changez pas de maison. De la même manière, dans un smartphone obsolète, il y a fort à parier que le haut-parleur, qui comporte un aimant permanent, est encore parfaitement utilisable.

Et à l'échelle individuelle, que peut-on faire ?
Allonger la durée de vie des appareils est essentiel. Garder son smartphone plusieurs années, privilégier la réparation ou le reconditionné. Mutualiser davantage : voiture partagée, outils de bricolage, et d'une manière générale tous les équipements que l'on utilise peu…

Sommes-nous prêts à cela ?
Il existe des signaux faibles, mais pas encore de bascule massive. Restreindre l'usage des terres rares implique de renoncer à une partie du surcroît de confort et de performance auquel nous nous sommes habitués. La solution n'est pas seulement technologique : elle est culturelle et politique. ■

Propos recueillis par F. N.

REUTERS/VIACHESLAV RATYNSKYI

Pilotables à distance, les drones FPV, initialement conçus pour les jeux vidéo de course, ont été détournés en engins kamikazes prisés pour leur agilité sur le champ de bataille (ici lors d'une inspection par un militaire ukrainien, en février 2024).

Drones

L'intelligence artificielle à l'offensive

L'utilisation massive de drones dans la guerre en Ukraine dessine le futur des conflits armés. Ces nouvelles armes obligent les militaires à repenser les doctrines et les cycles d'innovation. L'intégration de l'intelligence artificielle permet de pousser la modularité à des niveaux inédits en favorisant notamment les opérations en essaim, qui coordonnent plusieurs drones (aériens, terrestres, maritimes) pour accomplir des missions partagées.

Par Fanny Costes

En Ukraine comme en Russie, les drones sont aujourd'hui responsables d'environ 70 % des pertes humaines et matérielles. Ciel saturé de points noirs, frappes en série, défenses aériennes débordées : la guerre moderne s'écrit avec ces appareils lancés pour surveiller, renseigner, intercepter, détruire ou tuer. *« Le phénomène est sans précédent, tant d'un point de vue quantitatif — plusieurs millions d'unités produites et détruites chaque année — que par son influence sur la cinématique des opérations et la structure des forces »*, analyse Vincent Tourret, chercheur à l'université du Québec à Montréal (Canada). L'usage militaire des drones n'est pas nouveau. Dès la Première Guerre mondiale, des prototypes téléopérés apparaissent. Mais c'est dans les années 2000 que les États-Unis imposent un standard avec les MQ-1 puis MQ-9, conçus pour la surveillance et la reconnaissance. Ces drones s'inscrivent toujours dans une même vision : faire des avions sans pilote. Massifs (20 mètres d'envergure, plus de 2 tonnes à vide), et coûteux (30 millions de dollars), ils sont réservés à des missions longue portée, et restent inaccessibles à des défenses adverses peu dotées.

Le tournant est opéré en 2015 avec le TB2 turc, deux fois plus petit et dix fois moins cher. Lors du conflit du Haut-Karabagh en 2020, il offre à l'Azerbaïdjan une supériorité aérienne décisive. Mais dès 2022, avec la guerre en Ukraine, ces drones tactiques — TB2 côté ukrainien, Orion côté russe — s'adaptent et les pertes s'accumulent. Sur le terrain, des microdrones, reconfigurables et beaucoup moins chers s'imposent.

AZOV BATTALION/12TH BRIGADE/COVER IMAGES/SIPA

Plus autonomes, les drones kamikazes UAS Seth, produits en Ukraine, sont guidés au moyen de l'intelligence artificielle, détectant automatiquement leur cible (ici sur le front ukrainien, le 11 mars 2025).

« Les FPV (First person view) notamment, qui viennent du domaine du jeu et de la compétition, et qui ont été détournés pour faire du ciblage, puis transformés en petites munitions », décrit Patrick Aufort, directeur de l'Agence d'innovation de défense (AID). Ce sont des quadrirotors à batterie, pilotables à distance, pesant souvent moins d'un kilogramme hors charge explosive, et dont l'autonomie ne dépasse pas 20 kilomètres. Leur coût modeste — entre 500 et 3000 euros — permet une production massive : 1,5 million d'unités en Ukraine en 2024, plus de 4 millions en 2025. *« Ce succès vient de leur adéquation au terrain : les fantassins ont besoin d'outils à hauteur d'homme, pas de drones stratégiques »*, souligne Vincent Tourret. Plutôt que de les sophistiquer, on les simplifie pour les rendre adaptables et consommables à souhait. Surveillance, reconnaissance, frappe : une même base pour plusieurs usages.

Pour contourner le brouillage dont ils sont victimes, apparaissent des drones… filaires ! Ils sont reliés à leur opérateur par fibre optique mais peuvent quand même voler jusqu'à 100 m d'altitude sur 20 km, sans risque de perte de signal. En parallèle, les drones intercepteurs — véritables chasseurs de drones — se multiplient. Et les grands modèles ne disparaissent pas : la gamme s'élargit, chaque mission appelant son drone. *« Les Ukrainiens sont passés d'un usage artisanal à une "army of drones" structurée, intégrant des solutions issues du citoyen lambda comme d'entreprises hors défense »*, observe Patrick Aufort.

Une « révolution militaire » obligeant à repenser la guerre

Cette mutation, accélérée par l'urgence de terrain en Ukraine, n'est pas propre à ce conflit. Elle marque, selon Vincent Tourret, *« une révolution militaire »* qui oblige à repenser les doctrines, les formats et les cycles d'innovation. En France, longtemps en retrait, les lignes bougent. *« Un programme de développement classique dans la Défense prend plus ou moins dix ans, entre l'expression de besoin et le moment où le produit arrive sur le marché. Or, dans le domaine des drones, ce processus conduit à l'échec : quand le produit arrive, il n'est tout simplement plus d'actualité »*, résume Bastien Mancini, dirigeant de Delair, droniste français.

Le dispositif Rapid opéré par la Direction générale de l'armement (DGA), et par l'AID depuis 2018, a introduit des logiques plus « agiles » : développement sur fonds propres, qualification *a posteriori*, cycles courts. C'est dans ce cadre qu'a par exemple été conçu le DT46, un drone d'observation de nouvelle génération, doté d'une double configuration de décollage : avion ou VTOL (décollage vertical). *« Les gros drones avions nécessitent un terrain de foot pour les poser. C'est un vrai frein en terrain accidenté »*, explique Bastien Mancini. Cette solution a toutefois un coût énergétique : en mode avion, le drone vole 6 heures sur 100 km ; mais l'autonomie tombe à 3 h 30 en mode VTOL. Celui-ci nécessite en effet d'emporter des bras (en travers des ailes) qui

eux-mêmes portent des moteurs supplémentaires, lesquels nécessitent des batteries en plus. *« Résultat : le drone est plus lourd, et les bras en travers de l'aile "abîment" son profil aérodynamique »*, précise le dirigeant de Delair. Reste que le mode de décollage-atterrissage n'est pas le seul avantage de ce type de drone. Équipé de capteurs optroniques longue portée, il peut également transmettre des images et coordonnées de tir sans être repéré. On ne l'entend pas à 200 m, alors qu'un hélicoptère peut être repéré à 5 km.

Des architectures modulaires et évolutives

Cette nouvelle approche de développement commence donc à porter ses fruits. C'est aussi vrai pour les munitions téléopérées (MTO), ces drones kamikazes équipés d'une caméra et d'une charge explosive. *« En 2021, une demande d'information de la DGA avait révélé qu'il n'existait aucune solution française ou européenne, et conduit la France à commander en urgence des MTO américaines, les Switchblade,* relate Patrick Aufort. *En parallèle, deux appels à projets — Colibri (courte portée) et Larinae (longue portée) — ont permis de produire localement les premières MTO françaises (Oskar) en 18 mois. »*

Au-delà des performances, c'est la modularité qui devient stratégique. *« Il faut des architectures ouvertes permettant d'intégrer les évolutions sur le drone ou le logiciel sans avoir à tout requalifier à chaque fois »*, insiste Patrick Aufort. Exemple : la détection de mines peut mobiliser des radars pénétrants, des caméras optiques ou des détecteurs métalliques, chacun associé à des traitements IA spécifiques. *« Comme on ne peut pas mettre tous ces capteurs sur un seul drone, il faut pouvoir changer facilement les charges utiles et adapter le logiciel. »*

Pour structurer cette dynamique, la France a lancé en juin 2025 un « pacte drones aériens de défense », piloté par la DGA, afin de favoriser les coopérations industrielles et l'agilité technologique. Cette démarche modulaire, Delair et d'autres récents arrivés dans le giron de la Défense en ont fait une stratégie industrielle. *« Depuis l'été 2023, nous avons fait une trentaine d'évolutions sur nos drones déployés en Ukraine. Ces évolutions sont possibles grâce à la modularité de nos équipements »*, souligne Bastien Mancini. Pour une gamme de drones allant de 1 à 100 kg, la base est en effet identique : autopilotes, modules de communication et même stations au sol, qui permettent de contrôler le drone et de recevoir les images qui viennent de lui. Il peut s'agir d'une simple télécommande, d'une tablette, d'un PC portable accompagné d'une antenne mise sur un pied, voire d'un conteneur. *« En général, plus le drone est gros, plus la station l'est aussi,* souligne Bastien Mancini. *Dans notre cas, même si la partie matérielle peut varier en fonction du drone, c'est toujours le même logiciel. On parle*

FRAPPES

Trois types de drones pour couvrir tout le champ de bataille

TRÈS GRANDE PROFONDEUR (AU-DELÀ DE 200 KM) : *« C'est le domaine des campagnes de frappe stratégique. Ici vous avez les drones OWA (One way attack), lancés pour s'écraser sur leur cible »*, explique Vincent Tourret, chercheur à l'université du Québec (Canada). Exemples : les Shahed iraniens, rudimentaires mais capables d'embarquer 40 kg d'explosif. *« Leur fonction est surtout de saturer ou leurrer les défenses antiaériennes avant l'envoi de missiles. Peu importe s'ils touchent leur cible. »*

PROFONDEUR OPÉRATIONNELLE (50 À 100 KM) : Elle concerne les lignes logistiques, aérodromes, stocks de munitions. *« Les Russes ont un avantage avec des drones comme le Lancet ou le Molniya-2, conçus pour faire de gros dégâts. Mais à 30 000 dollars l'unité, ils sont moins faciles à massifier. »*

PROFONDEUR TACTIQUE (0 À 30 KM) : celle des combats directs. *« Un engin comme le DJI Mavic chinois est une balle qui vole à plus de 100 km/h, chargée de 2 à 6 kg d'explosifs, pilotée à distance. Pour être efficace, elle doit être accompagnée de drones répéteurs et de reconnaissance. »* Et désormais, les drones intercepteurs s'imposent. *« Comme dans le combat aérien : on observe, on protège, on bombarde »*, résume le chercheur.

DELAIR

« On ne parle pas d'IA générative mais d'IA embarquée. Si les LLM ont le Web comme données d'entraînement, nos systèmes ont le monde physique »

Bastien Mancini, président et cofondateur de la société Delair, fabricant français de drones

THOMAS GOISQUE

Le drone français Delair DT46, déployé dans l'armée de terre en 2025, dispose d'une portée de 80 km et est relié à l'artillerie au sol (ici sur le plateau du Larzac).

de "station sol universelle" car elle permet de contrôler plusieurs drones, même ceux d'autres constructeurs. »

Les opérations en essaim, la prochaine rupture annoncée

Aujourd'hui, les plus grandes innovations résident dans l'intégration de l'intelligence artificielle, qui permet de pousser la modularité à des niveaux inédits. *« On ne peut pas utiliser des missiles antiaériens comme le Patriot, qui coûte un million d'euros pièce, quand 1000 Shahed iraniens peuvent être fabriqués chaque jour pour alimenter les Russes à raison de 20000 à 50000 dollars l'unité. Notre idée a été de créer une architecture logicielle pouvant s'intercaler sur tout drone intercepteur* », explique Hadrien Canter, cofondateur d'Alta Ares, société spécialisée dans le développement d'IA embarquée pour la Défense. C'est ainsi qu'est né Pixel Lock, algorithme embarqué capable de guider un drone lancé à 300 km/h vers une cible évoluant à 250 km/h. Grâce à la fusion multicapteurs — radio, radar, lidar ou optronique qui équipent le drone — et au guidage autonome sans positionnement par satellite, l'IA détecte, suit et intercepte en temps réel. Plusieurs start-up et industriels, accompagnés par l'AID, s'attellent d'ailleurs à développer des algorithmes de navigation par vision de plus en plus sophistiqués pour permettre aux drones militaires de continuer à se repérer en cas de brouillage. Récent exemple, Harmattan AI est devenue une licorne française en seulement 21 mois d'existence après avoir convaincu la DGA, puis conclu un partenariat stratégique avec Dassault Aviation en janvier. Son savoir-faire : fournir aux forces armées une IA souveraine et évolutive développée pour la prise de décision autonome, à travers des modèles capables d'opérer sous contrainte temporelle forte avec des données incomplètes ou brouillées, comme celui qui équipe son drone Gobi.

POUR EN SAVOIR PLUS

L'étude de Vincent Tourret « Désigne, détruit, domine : la dronisation massive des opérations comme potentielle révolution militaire » est disponible sur le site de l'Ifri : **sciav.fr/950drone**

« On ne parle pas d'IA générative mais bien d'IA embarquée. Si les LLM ont le Web comme données d'entraînement, nos systèmes ont le monde physique », précise Bastien Mancini. Ces IA sont aussi peu gourmandes en ressources : certaines tournent sur des nano-ordinateurs comme des Raspberry Pi ou des tablettes Android. Et des plateformes, comme Ulix d'Alta Ares, permettent aux unités d'entraîner leurs modèles localement, sans *cloud*.

Avec les opérations en essaim — la prochaine rupture annoncée —, l'intégration de l'IA permettra en outre de coordonner plusieurs drones (aériens, terrestres, maritimes) pour accomplir une mission partagée. Ratisser plus rapidement une zone, saturer le champ de bataille, détourner l'attention, attaquer en meute : autant de scénarios qui nécessitent une autonomie distribuée.

Car un essaim ne se pilote pas drone par drone. Il repose sur la capacité des engins à s'accorder entre eux. En juin 2025, l'Agence ministérielle pour l'IA de défense (Amiad) et le Commandement du combat futur (CCF) ont lancé le projet Pendragon, visant à créer une unité mixte de robots terrestres et de drones aériens. *« L'objectif ultime, c'est l'intelligence collective pour ces essaims : comment se reconfigurer en cas de destruction d'un drone, comment répartir les fonctions au sein de la mission, et comment s'adapter aux événements imprévus* », explique Patrick Aufort.

Mais attention aux illusions. *« On ne parle pas de milliers de drones comme on en voit lors de spectacles grand public. Pour ces shows, chaque drone est programmé mais il n'interagit jamais avec son voisin* », rappelle Bastien Mancini. La première étape, selon lui, consiste à faire communiquer les drones entre eux : deux, puis cinq, puis dix. *« Le fait d'avoir conçu des drones et MTO utilisant les mêmes modules de communication est clairement un avantage. Mais il faut encore travailler.* » ■

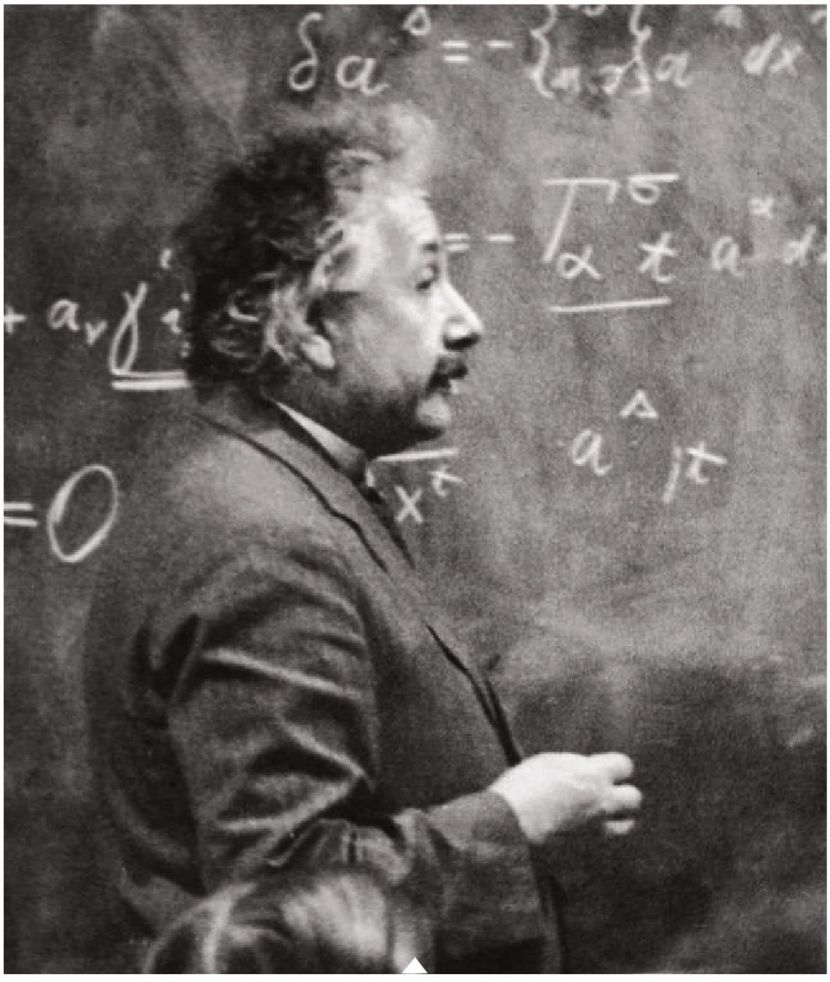
ARMES LÉTALES AUTONOMES

Qui décide de tuer ?

En France, la doctrine reste claire : drones et IA doivent être conçus, déployés et commandés par des humains. *« Aujourd'hui, les IA font des erreurs, même les plus avancées. Le pourcentage d'erreur, si minime soit-il, n'est pas acceptable »*, tranche Bastien Mancini, patron de Delair, qui appelle à une interdiction des drones totalement autonomes. Mais tous les compétiteurs ne partagent pas ces principes. Les États-Unis, la Russie, la Chine ou Israël investissent massivement dans le développement de Systèmes d'armes létaux autonomes (Sala). En Russie, les drones kamikazes V2U testeraient des algorithmes conçus pour leur permettre de sélectionner et d'engager des cibles (matérielles et humaines) sans intervention humaine. L'ONU a appelé de son côté à un traité d'interdiction des armes létales autonomes pour cette année.

Relativité : et si les constantes variaient ?

En modifiant les équations de la relativité générale établies par Einstein, la relativité intriquée développée par Olivier Minazzoli suggère que la constante de gravitation G et la constante de Planck h ne sont peut-être pas immuables, mais des champs dynamiques dépendant de leur environnement.



HULTON-ARCHIVE/GETTY IMAGES

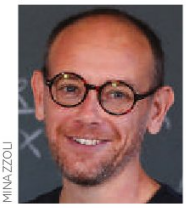
Publiée par Albert Einstein en 1915, la relativité générale décrit comment la masse et l'énergie courbent l'espace-temps. Cette théorie reste l'un des piliers de la physique, tout en faisant toujours l'objet de nouvelles recherches.

Certaines des constantes les plus fondamentales de la physique sont-elles aussi immuables qu'on le croit ? C'est la question que pose une variante de la théorie de la relativité d'Einstein : la relativité intriquée. Développée par Olivier Minazzoli et son équipe au laboratoire Artemis de l'observatoire de la Côte d'Azur, à Nice, elle suggère que la constante de gravitation G et la constante de Planck h pourraient ne pas être des constantes fondamentales, mais des quantités « émergentes », susceptibles de varier dans l'espace et dans le temps, en fonction de leur environnement. Si elle se confirmait, cette hypothèse récemment présentée dans la revue *Classical and Quantum Gravity* bouleverserait notre manière d'appréhender l'Univers et ses lois fondamentales.

Cela fait maintenant une dizaine d'années qu'Olivier Minazzoli fait entendre une petite musique originale au sein de la communauté des physiciens relativistes. *« Ce que la relativité intriquée change par rapport à la relativité générale ? Pas grand-chose en réalité, mais c'est lourd de conséquences. On modifie simplement la manière dont la matière et la courbure de l'espace-temps sont couplées. Au lieu d'un couplage linéaire, on a un couplage non linéaire, ce qui fait que la théorie ne peut plus être définie en l'absence de matière »*, explique le physicien. En effet, la relati-

vité générale d'Einstein définit la façon dont la matière déforme l'espace-temps. Mais avec une particularité : l'absence de matière n'empêche pas l'existence de l'espace-temps. Autrement dit, il pourrait exister un univers totalement vide. Cette idée n'a jamais convaincu Albert Einstein, très influencé par le physicien et philosophe autrichien Ernst Mach (1838-1916), pour qui l'espace et le mouvement n'ont de sens qu'en présence de matière.

En modifiant le couplage mathématique entre matière et espace-temps, Olivier Minazzoli reformule ainsi la relativité générale d'une manière plus conforme à cette intuition : pour qu'un univers existe, encore faut-il qu'il contienne de la matière. Pour autant, pas question de contester toute la relativité générale, qui a fait maintes fois la démonstration de sa validité. « *Dans les situations ordinaires, la relativité intriquée est indiscernable de la relativité générale* », insiste le physicien. Dans le Système solaire, elle conduit ainsi aux mêmes prédictions que la théorie d'Einstein. C'est dans des environnements plus extrêmes — là où la gravitation devient intense et la matière très dense — que les différences commencent à apparaître. Voici pourquoi… « *Dans le cas de la relativité générale, G apparaît explicitement dans les équations qui décrivent le couplage matière/espace-temps. Et quand on veut étudier ses aspects quantiques, h apparaît alors également. Dans la version intriquée, le lien non linéaire entre matière et espace-temps permet de formuler la théorie sans les introduire d'emblée* », détaille le physicien. Autrement dit : ces constantes ne disparaissent pas, mais elles changent de statut. « *Ce ne sont plus des constantes fondamentales : ce sont des champs* », précise Olivier Minazzoli.


MINA ZZOLI

« Ce que la relativité intriquée change par rapport à la relativité générale ? Pas grand-chose en réalité, mais c'est lourd de conséquences »

Olivier Minazzoli, astrophysicien à l'Observatoire de la Côte d'Azur, à Nice

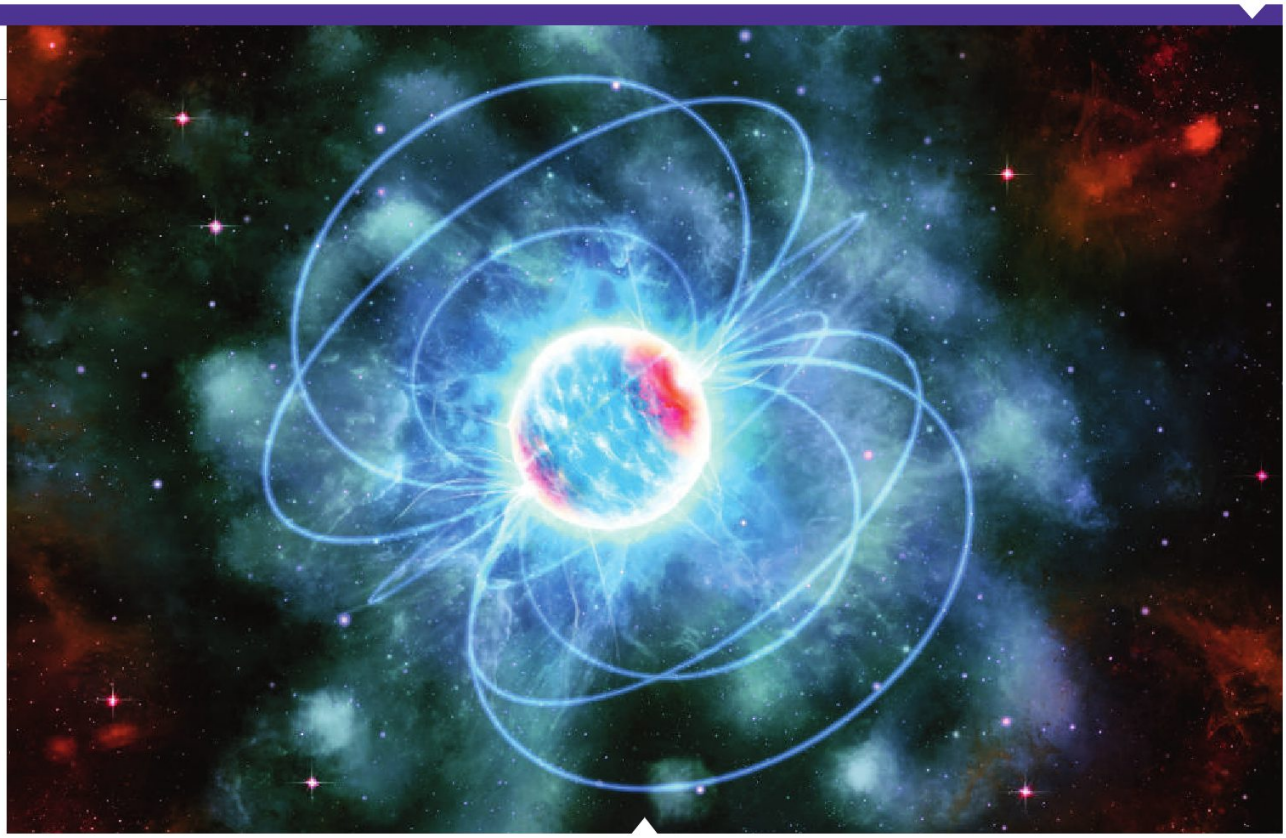
Un lien direct entre gravitation et quantique

Un champ est une grandeur définie en chaque point de l'espace et du temps. La température de l'air est un exemple de champ familier : elle n'a pas une valeur unique, mais varie d'un endroit à l'autre. En relativité intriquée, la constante de Planck h et la constante de gravitation G se comportent de la même manière. Leur valeur correspond à l'état pris par ces champs au cours de l'histoire cosmique. Dans l'Univers ordinaire — le Système solaire, les laboratoires terrestres — le champ est quasiment uniforme : h et G prennent alors des valeurs constantes, indiscernables de celles que nous mesurons depuis un siècle. En revanche, dans des environnements extrêmes, où la matière est très dense, dans une étoile à neutrons par exemple, le champ peut légèrement varier. Donc h et G aussi… Ce qui rend cette approche particulièrement stimulante, c'est que ces deux constantes renvoient à des domaines de

ÉPISTÉMOLOGIE

Deux constantes, deux piliers de la physique

La constante de gravitation G et la constante de Planck h se partagent l'infiniment grand et l'infiniment petit de la physique. La constante G apparaît à la fin du XVII^e^ siècle dans la loi de la gravitation universelle formulée par Isaac Newton. Elle fixe l'intensité de l'attraction entre deux masses. C'est l'interaction à plus longue portée connue : elle s'exerce en principe quelle que soit la distance et règle les mouvements des planètes, des étoiles et jusqu'aux ballets des galaxies entre elles. Lorsque Albert Einstein élabore la relativité générale en 1915, G ne disparaît pas : elle reste le paramètre qui relie la matière et la géométrie de l'espace-temps, déterminant dans quelle mesure la présence de matière courbe l'espace-temps et engendre la gravitation. La constante de Planck, notée h ou ħ (prononcer « h barre », soit h/2π), surgit au début du XX^e^ siècle dans un tout autre contexte. En 1900, le physicien allemand Max Planck cherche à comprendre le spectre de la lumière émise par un corps chauffé. Pour expliquer ses observations, il propose une idée originale : l'énergie lumineuse n'est pas émise de manière continue, mais par petits paquets, des quanta. Leur taille est fixée par une nouvelle constante, h. Cette hypothèse ouvre la voie à toute la mécanique quantique. La constante de Planck fixe l'échelle à laquelle apparaissent les phénomènes quantiques : négligeables dans notre quotidien, ils deviennent dominants à l'échelle des atomes et des particules. Les physiciens définissent ainsi des unités dites de Planck, qui correspondent aux échelles ultimes de distance et de temps imaginées par la physique actuelle.



ICE-CSIC/D. FUTSELAAR/MARINO ET AL.

Vue d'artiste d'une étoile à neutrons, l'un des objets les plus denses de l'Univers. La théorie de la relativité intriquée prédit que certaines constantes fondamentales de la physique pourraient varier dans un tel champ gravitationnel extrême.

la physique souvent présentés comme difficilement conciliables. La constante de gravitation G fixe l'intensité de la gravitation et gouverne la structure de l'espace-temps à l'échelle des galaxies et des amas de galaxies. La constante de Planck h, elle, est au cœur de la mécanique quantique et du monde des particules élémentaires. *« Nous établissons ainsi un lien direct entre un paramètre purement gravitationnel et un paramètre purement quantique »*, résume Olivier Minazzoli.

Un tel pont ouvre des perspectives nouvelles sur notre compréhension du monde physique. *« Fondamentalement, l'Univers obéit aux lois de la physique quantique,* rappelle Olivier Minazzoli. *Si notre quotidien nous apparaît classique, c'est parce que la constante de Planck est très petite. Si h était plus grande, des effets quantiques seraient perceptibles à des échelles beaucoup plus grandes. »* En effet, h fixe l'échelle à laquelle les effets quantiques deviennent significatifs. Lorsque l'action caractéristique d'un système est grande devant h, le comportement est décrit par la physique classique. Quand l'action d'un système devient comparable à h, le comportement cesse d'être classique et devient quantique. De même, la faiblesse apparente de la gravitation due à la valeur de G constitue l'un des grands mystères de la physique. Comparée aux autres interactions, la gravitation semble en effet bien dérisoire. *« Un simple aimant posé sur un réfrigérateur suffit à contrecarrer l'attraction gravitationnelle exercée par l'ensemble de la masse de la Terre »*, souligne Olivier Minazzoli.

Des pistes d'observation difficiles à exploiter

Cette faiblesse n'est donc peut-être pas un fait isolé. Dans la relativité intriquée, la constante de gravitation G et la constante de Planck h ne sont plus indépendantes : elles émergent d'un même champ et varient de concert. Un univers où la gravitation est faible est aussi un univers où h est petite. Une connexion qui suggère l'existence d'un lien profond — encore à définir — entre gravitation et mécanique quantique. Reste à confronter cette théorie à l'observation. Or, pour la première fois, Olivier Minazzoli, avec Thomas Chehab et Aurélien Hees, proposent des pistes observationnelles dans des environnements extrêmes, là où la gravitation devient intense et la matière extraordinairement dense : les naines blanches et les étoiles à neutrons. La relativité intriquée pourrait y laisser des traces observables. En particulier, une variation de la constante de Planck h entraînerait des conséquences directes sur la lumière émise par ces astres. Pour l'heure, ces pistes restent toutefois difficiles à exploiter, les signatures attendues sont faibles et délicates à distinguer d'autres effets astrophysiques. La composition de l'atmosphère des étoiles, la présence de champs magnétiques intenses compliquent fortement l'interprétation des données. *« Ce n'est pas dit que ça marche »*, reconnaît Olivier Minazzoli. Autrement dit, si la relativité intriquée ouvre la voie à des tests observationnels, leur mise en œuvre demandera des observations très précises et des modèles astrophysiques robustes. Le prix à payer pour oser retoucher le chef-d'œuvre d'Einstein. ■ **Fabrice Nicot**

ALDA MARI
LINGUISTE, DIRECTRICE DE RECHERCHE CNRS

« Détecter les situations d'urgence sur les réseaux sociaux »

La linguiste Alda Mari est lauréate de la médaille de l'innovation 2025 du CNRS pour la conception du logiciel Intact, une intelligence artificielle qui fait remonter les informations urgentes dans les réseaux sociaux lors d'une crise environnementale.

Comment avez-vous appliqué l'IA à l'étude des langues ?
J'ai commencé le grec au lycée. J'ai poursuivi mes études hellénistiques en y associant une langue indo-européenne, le sanskrit. C'est dans ce contexte que j'ai découvert la linguistique, autrement dit l'étude du langage en tant que faculté cognitive. L'approche de la linguistique dans laquelle je travaille a comme postulat qu'il existe des règles communes à toutes les langues. J'essaie de remonter à ces abstractions partagées par tous les êtres humains : si un enfant est capable de parler chinois ou français, c'est parce qu'il possède cette mécanique interne lui permettant d'être exposé à n'importe quelle langue et de l'apprendre… À mon entrée à l'université, l'usage d'Internet se démocratisait. Cela a permis l'émergence de deux disciplines de la linguistique. D'une part, la sémantique formelle, mon principal sujet d'étude : il s'agit d'appliquer les techniques de l'analyse logique et mathématique à l'étude du langage. C'était, d'autre part, le tout début du traitement automatique du langage naturel (TAL), c'est-à-dire l'analyse du langage par le biais d'algorithmes informatiques.

BIO EXPRESS

- **1987-1992 :** Étude du grec et du latin au lycée Parini de Milan (Italie).
- **1992-1997 :** Études du grec, du sanskrit et de linguistique à l'université de Lausanne (Suisse).
- **1996-1997 :** Spécialisation en linguistique computationnelle à l'Irit, à Toulouse.
- **2004-2005 :** Spécialisation en logique à l'université de New York (États-Unis).
- **Depuis 2014 :** Directrice de recherche CNRS à l'Institut Jean-Nicod, à Paris.
- **Décembre 2025 :** Lauréate de la médaille de l'innovation du CNRS.

À quoi sert le logiciel Intact que vous avez développé ?
Ce programme d'intelligence artificielle a été codéveloppé avec l'informaticienne Farah Benamara, de l'Institut de recherche en informatique de Toulouse (Irit). Nous avons uni nos forces pour concevoir Intact en réponse à un appel du ministère de l'Intérieur. Il peut être branché sur un réseau social comme Facebook ou X pour analyser les messages écrits en temps réel et détecter une situation d'urgence. Intact y parvient avec une précision de 92 %. C'est aussi un logiciel que l'on peut implémenter : à la demande du service public qui va l'utiliser, nous allons lui ajouter une fonctionnalité pour traiter le flux RSS des journaux locaux. Cela permettra de faire une évaluation de la situation d'après-crise.

Pourquoi vous êtes-vous intéressée aux réseaux sociaux ?
Quand une crise survient — inondation, tempête, etc. —, la population publie énormément en ligne pour décrire la situation. Elle donne, sans nécessairement le savoir ou le vouloir, quantité d'informations utiles pour les secours.

Les gens n'ont plus le réflexe d'appeler les pompiers au « 18 »…
Non, ils vont sur les réseaux pour dire qu'une maison s'est effondrée. Pour concevoir Intact, nous nous sommes donc intéressées aux renseignements factuels pour faire des classifications utiles aux secours : « écroulement d'immeubles », « bétail dispersé », « mouvements de population »… Les résultats étaient bons, mais pas époustouflants.

QUENTIN HOUDAS/LEEXTRA POUR SCIENCES ET AVENIR

« Quand une crise survient (inondation, tempête…), la population publie énormément en ligne pour décrire la situation »

Il fallait comprendre comment nous, humains, faisions la différence entre plusieurs messages et savions repérer celui qui nous fait dire : *« Là, il faut vraiment y aller. »* J'ai eu l'intuition qu'il fallait faire intervenir quelque chose de très simple linguistiquement : les actes de langage.

De quoi s'agit-il ?
Ce sont les formes prises par un contenu qui peut être dit comme une simple affirmation ou, au contraire, modalisé subjectivement, par exemple en étant présenté comme un ordre ou une exclamation.

Qu'avez-vous observé ?
Lorsque c'est vraiment urgent, la population est très… rationnelle. Elle fait des phrases déclaratives, elle décrit très bien la situation en écartant toute la subjectivité, ce qu'on sait très bien reconnaître avec l'IA. Intact fait ce travail de tri et fait remonter ce qui est vraiment urgent.

C'est très contre-intuitif !
Au départ, l'hypothèse était qu'on allait avoir plein d'ordres : *« Venez me secourir, il faut absolument venir très vite… »*. Pas du tout ! Dans les faits, on n'écrit jamais : *« Au secours ! urgent ! attention ! »* Cela s'explique : si par exemple un de vos proches est victime d'une attaque cardiaque, inutile de crier au téléphone sur les pompiers. Il faut être froid et descriptif : *« Ma mère a tel symptôme, qu'est-ce qu'il faut que je fasse, etc. »* Sur les réseaux sociaux, on observe à peu près le même comportement, comme si les gens savaient qu'ils pouvaient aider en décrivant leur situation de la façon la plus objective possible.

Cette distinction entre vérité subjective et vérité objective est au cœur de votre travail de linguiste.
Il y a une vérité objective et il y a 8 milliards de vérités subjectives. Dire : *« Je crois que… »*, c'est décrire notre représentation de la réalité, pas la réalité telle qu'elle est. Les langues sont truffées de ces modalités. Et il n'y a pas que les mots que l'on choisit : la prosodie et les intonations sont aussi des indices indiquant à notre locuteur si nous parlons de la réalité ou de notre vision du monde.

Cette subjectivité, elle nous caractérise en tant qu'humains…
Imaginons que je redoute qu'il pleuve et qu'au moment de quitter mon bureau j'aperçois soudain un parapluie. Je panique : *« Ah mince, ça y est, il pleut. »* Je ne suis pas en train de décrire la réalité : mon langage transcrit mes peurs ou mes croyances — j'ai sans doute entendu le matin à la radio qu'il allait pleuvoir… Il en est ainsi parce que nous sommes des êtres d'émotion.

C'est ce qui nous différencie encore des IA génératives ?
Absolument ! Cela a été prouvé par de nombreuses études scientifiques : les IA génératives actuelles gèrent très mal cette question de la subjectivité. Chez nous, locuteurs humains, la subjectivité est une façon de restituer notre expérience du monde. Or, une IA générative n'a pas de représentation du monde. Elle ignore ce qu'est le réel. Elle est incapable d'en faire une évaluation par la connaissance ou la volonté. L'IA générative ne peut que construire des phrases de façon statistique, sans aucune autre intention que de renvoyer la balle à celui qui l'interroge. C'est une machine sans ancrage au monde. ■

Propos recueillis par Olivier Lascar

WAGON LANDSCAPING

Le Jardin joyeux à Aubervilliers (Seine-Saint-Denis) est emblématique de la renaturation d'un sol autrefois artificialisé : l'enrobé de cet ancien parking a été fracturé et les matériaux ont servi à créer ce jardin de rocaille de 1600 m² où plus de 150 plantes ont été introduites.

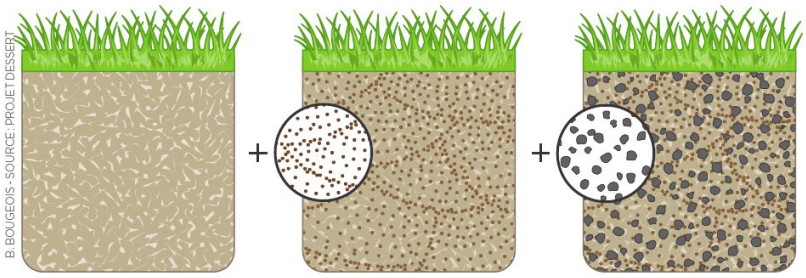
Renaturation
Les sols urbains passent au vert

La végétalisation des villes sera l'une des priorités des nouvelles équipes municipales. Mais les projets achoppent souvent par une méconnaissance de la complexité des sols en ville. Des programmes de recherche proposent des solutions originales en valorisant les déchets de construction afin de rendre la terre à nouveau fertile.

Par Fanny Costes

Faire revenir la nature en ville : c'est indiscutablement l'un des thèmes phares de la campagne des élections municipales dans les grandes agglomérations. Des candidats veulent faire de Toulouse une *« ville-jardin »*, créer *« une véritable forêt urbaine pensée comme un équipement climatique »* sur les quais de Lyon, ou faire de Nantes *« une zone d'accueil pour la biodiversité »*. Un mouvement qui confirme la renaturation comme tendance de fond dans l'agenda des municipalités. Plaine Commune vise la plantation de 20 000 arbres d'ici à 2030 en Seine-Saint-Denis, Bordeaux Métropole porte le programme « Plantons 1 million d'arbres », et la métropole lyonnaise prévoit de désimperméabiliser 400 hectares. Objectifs : créer des puits de carbone, lutter contre les îlots de chaleur, améliorer l'infiltration des eaux pluviales face à l'intensification annoncée des précipitations. Mais pour réintroduire une nature résiliente dans des milieux aussi anthropisés, il faut dépasser les slogans et clarifier les termes. *« Aujourd'hui, tout le monde parle de désimperméabilisation, de végétalisation ou de renaturation sans définir précisément ce dont il s'agit. Or c'est primordial »*, souligne Philippe Branchu, ingénieur de recherches sol et eau au Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement).

La désimperméabilisation, c'est permettre à l'eau de circuler à nouveau, quand la végétalisation peut se limiter à installer du vert, parfois hors sol. Mais la renaturation, elle, va plus loin. Promulguée en 2021, la loi climat et résilience — qui aligne la France sur la trajectoire européenne de –55 % d'émissions de gaz à effet de serre en 2030 par rapport à 1990 — la définit comme la restauration ou l'amélioration de



Granulat de voirie seul

Granulat de voirie + compost de déchets verts

Granulat de voirie + compost de déchets verts + enrobé concassés (bitume)

3 exemples d'enrichissement de sols « descellés »

Les matériaux déjà présents sur place et les déchets verts locaux peuvent constituer une base de sol pour accueillir végétation et faune après le « descellement » (suppression du couvert imperméable des sols).

la fonctionnalité d'un sol, transformant un sol artificialisé en sol non artificialisé. Autrement dit, il s'agit de réparer un écosystème dégradé. *« L'objectif est d'augmenter sa capacité à offrir habitat, stockage de carbone, filtration de l'eau, régulation du climat local »*, énumère Geoffroy Séré, directeur adjoint du Laboratoire sols et environnement (LSE) de l'université de Lorraine.

Le sol est la base de toute stratégie de renaturation en ville. *« Sans sol fertile, pas de végétal. Et sans sol capable d'accueillir la biodiversité, impossible d'avoir un écosystème terrestre fonctionnel »*, rappelle le chercheur. Pourtant, il reste le parent pauvre des politiques de nature en ville : *« On voit le végétal, mais pas ce qui le porte »*, déplore Philippe Branchu. Or un sol n'est pas une simple surface, c'est un volume vivant. Il est même officiellement reconnu depuis 2025 comme un patrimoine commun, essentiel à la biodiversité, à la sécurité alimentaire et à la lutte contre le changement climatique.

Des sols fertiles recréés en valorisant les déchets

Sa formation naturelle — la pédogenèse — dépend de la roche, du climat, des organismes qui le peuplent, du relief. Elle prend des milliers d'années. Sa destruction, elle, peut être instantanée. En ville, les sols ont souvent été décapés, compactés, remblayés, parfois remplacés. *« Beaucoup pensent qu'il suffit d'enlever le bitume pour retrouver le sol, mais c'est rarement le cas,* poursuit-il. *L'artificialisation s'accompagne souvent du retrait de la matière organique présente sur 50 cm, voire 1 mètre, remplacée par des matériaux portants comme les graviers, sables ou mâchefer. »*

Cette histoire complexe produit une hétérogénéité extrême des sols qui n'a pas d'équivalent dans les milieux ruraux. *« Évoquer les sols urbains, c'est parler en réalité de gradients d'anthropisation : des sols de forêt presque naturels, des sols agricoles, des jardins enrichis, des friches industrielles, des sols sous voirie… »*, observe Geoffroy Séré. Face à cette diversité, une cartographie très fine serait utile aux collectivités pour planifier leurs projets, mais dans les faits, elle s'avère impossible à produire tant la réalité est complexe. *« Un projet de renaturation est intensément lié au contexte urbain. Comme aucun ne prend de médicaments sans diagnostic, il faut d'abord examiner tous les paramètres »*, insiste Geoffroy Séré : acidité, texture, teneur en matière organique, contaminants. Las, de nombreux programmes démarrent encore en omettant cette étape.

Un récent projet intitulé Dessert, cofinancé par l'Ademe et dont les conclusions ont été rendues publiques en 2025, a permis de mieux comprendre les propriétés des sols, une fois que le couvert imperméable artificiel a été retiré (les scientifiques parlent de « descellement »). Des expériences conduites sur des matériaux prélevés sur des sites à Angers, Nancy et Cannes ont révélé que, dans certains cas, retirer la couche suffit à relancer les processus biologiques. Mais le plus souvent, il faut décompacter, réintroduire de la matière organique ou reconstituer entièrement un sol fertile.

PÉDOFAUNISTIQUE

Vers, collemboles, cloportes… Les nouveaux « ingénieurs du sol »

Dans les sols urbains dégradés, la faune du sol reste largement invisible…, mais elle pourrait devenir un levier majeur de renaturation. C'est l'hypothèse explorée par la thèse de Lucie Caron, qui propose de développer une véritable ingénierie pédofaunistique : l'utilisation ciblée des invertébrés du sol pour restaurer les fonctions écologiques perdues. Vers (*photo*), collemboles, cloportes ou carabes jouent en effet un rôle déterminant dans la structuration du sol, la décomposition de la matière organique, la régulation microbienne et les cycles des nutriments. La thèse propose de sélectionner ces organismes non pas au hasard, mais selon leurs traits fonctionnels : capacité à creuser, fragmenter, mélanger, disperser. Objectif : constituer de véritables « équipes d'ingénieurs du sol » adaptées aux contraintes urbaines.

ARNAUD ANOTTA / NATURIMAGES

THOMAS BARON/HANS LUCAS

P. NIN, MAIRIE DE TOULOUSE

Sur l'île du Ramier à Toulouse, 10 hectares ont été revégétalisés et fertilisés, avec notamment 25 000 arbres et arbustes plantés. Le parc Picot de Lapeyrouse, inauguré en janvier (à droite), a remplacé les parkings et bâtiments de l'ancien parc des expositions.

Plusieurs approches ont été comparées entre 2021 et 2024 : laisser le granulat de voirie, y ajouter du compost de déchets verts, introduire des enrobés concassés ou de la terre végétale.

L'ambition était aussi de privilégier une logique d'économie circulaire. Longtemps, en effet, les projets urbains ont reposé sur un réflexe : importer de la terre végétale depuis la périphérie des villes et y exporter, dans des centres de stockage de déchets, les matériaux de déconstruction. *« Mais avoir 4 % de matière organique à un mètre de profondeur n'a aucun sens, sauf pour des sols tourbeux. En milieu agricole, ce pourcentage est de 1 à 2 % et en surface ! C'est une perte d'argent et cela crée des milieux dopés où les espèces végétales dominantes, comme les graminées, étouffent les autres,* déplore Quentin Vincent, directeur technique du pôle « sols vivants » chez EODD Ingénieurs-conseils. *Les sols urbains pauvres, variés, peuvent pourtant devenir des habitats d'intérêt écologique.* » L'ingénierie pédologique propose ainsi de recréer des sols fertiles, non pas en utilisant des ressources naturelles, mais en valorisant des déchets et sous-produits issus de nos activités humaines (déchets verts, boues de station d'épuration, déchets de briques, ballast usagé).

Coordonner racines des arbres et réseaux enterrés

On parle alors de technosols construits : des mélanges de matériaux réutilisés pour imiter les propriétés d'un sol naturel. Cette approche limite les transports, réduit l'empreinte carbone et valorise des matériaux disponibles en ville. Le projet Dessert a permis de confirmer *« que ces sols construits pouvaient accueillir de la biodiversité et supporter une végétation durable »*, se réjouit Robin Dagois, chargé de mission chez Plante & Cité. Auparavant, le projet Siterre 1 avait déjà inventorié des matériaux « modèles » minéraux et organiques pour créer des sols fertiles, après avoir analysé leurs propriétés. *« Nous avons utilisé des écarts de briques* [briques de rebut concassées], *qui permettent d'avoir une bonne capacité de drainage tout en retenant de l'eau. Nous avons aussi travaillé avec des sédiments de dragage, des terres dépolluées, du béton. Pour les matériaux organiques, nous utilisons des déchets verts, compostés ou non, issus de la taille des arbres et de la tonte des pelouses,* cite en exemple Geoffroy Séré. *Nous avons également employé des boues de stations d'épuration et des boues de papeterie, riches en matières organiques et qui retiennent bien l'eau.* » Une nouvelle discipline, le génie pédofaunistique, vise par ailleurs à inoculer ou à attirer la faune du sol (vers de terre, carabes, cloportes) dans des sols dégradés pour restaurer les fonctions écologiques perdues (*lire l'encadré ci-contre*).

Les interventions dépendent ensuite de l'usage : rafraîchir une cour d'école, créer un jardin partagé, ou façonner un corridor écologique n'impose pas les mêmes contraintes. *« L'usage conditionne les solutions techniques. Mais il est tout à fait intéressant d'adapter les futurs usages aux sols et à leurs contraintes »*, rappelle Christelle Neaud, responsable d'études en écologie urbaine au Cerema. Un tra-

BILAN

Les microforêts en question

Principalement portées par des start-up et des collectifs citoyens, les microforêts se sont multipliées en ville, souvent avec des promesses ambitieuses : biodiversité accrue, rafraîchissement rapide, stockage de carbone. Mais les preuves manquent. D'où le lancement du projet SylvaDense, qui préfère parler d'« îlots boisés denses ». Piloté par Plante & Cité et l'Inrae de Bordeaux, le programme s'appuie sur une thèse Cifre (2024-2027). Objectifs : recenser les essences plantées, évaluer leur reprise et comparer les résultats selon les modes de plantation (entreprises spécialisées, services techniques, chantiers participatifs). Des protocoles ciblent aussi arthropodes, avifaune et mammifères. Et un volet sur l'effet climatique — notamment l'abaissement des températures — doit être déployé. *« Nous réimplantons les conditions d'un écosystème, pas seulement des arbres,* souligne Jim Bouchet, cofondateur de MiniBigForest, dont quatre miniforêts vont être étudiées dans le cadre de SylvaDense. *En revanche, nous avons toujours refusé de faire des promesses en matière de captation carbone : les espaces sont beaucoup trop petits pour imaginer un impact significatif, et les jeunes plants vont demander quelques années avant de pouvoir jouer ce rôle de puits de carbone. »*

vail qui nécessite d'unir les compétences de pédologues, écologues, paysagistes, et parfois d'hydrologues.
D'autant plus qu'ils doivent composer avec une difficulté propre aux villes : la concurrence entre racines et réseaux enterrés. *« Les collectivités ont annoncé des objectifs ambitieux de plantation avant de se demander où les arbres pourraient réellement s'implanter »*, note Pauline Laïlle, responsable de la coordination scientifique chez Plante & Cité. Les sites faciles, sur les franges déjà boisées ou les voies vertes, ont été privilégiés, alors que les besoins sont au cœur des villes surchauffées. Or, le premier mètre de sol y est saturé de réseaux. Les racines, opportunistes, colonisent les tranchées, créant des conflits : racines qui endommagent les réseaux, terrassements qui abîment les arbres, fosses d'arbres trop petites. Ajoutons à cela une méconnaissance globale du comportement des racines des arbres dans les sols. Résultat : *« des arbres qui végètent ou dépérissent »*.
L'enjeu est donc de mieux coordonner les chantiers : choix des matériaux, des essences, orientation des racines pour protéger les réseaux. Et tous les experts s'accordent : il faut rompre avec l'uniformisation végétale. *« On a voulu des platanes de Lille à Cannes. Il faut revenir aux considérations locales »*, rappelle Geoffroy Séré. Cela implique de revoir notre conception de la nature en ville. *« On peut très bien faire avec un substrat ingrat, très calcaire, très drainant, et obtenir un milieu d'intérêt »*, poursuit Quentin Vincent. Il cite le Jardin joyeux, à Aubervilliers (Seine-Saint-Denis), réalisé par l'agence Wagon Landscaping, où l'enrobé d'un ancien parking a simplement été cassé avant de planter 150 espèces adaptées, et *« le milieu est magnifique ! »*. *« Parfois il faudra reconstruire un sol, mais il n'y a pas une solution meilleure qu'une autre ; cela dépend d'où on part et où on veut aller. »*

Pour assurer le suivi, un appel aux sciences participatives

Vient ensuite un autre problème : le suivi des projets. *« Quand il existe, la plupart du temps il s'arrête après trois ans, alors que les sols évoluent sur des décennies »*, regrette Christelle Neaud, qui plaide pour des protocoles de sciences participatives afin de documenter l'évolution réelle des sols renaturés en impliquant la population. Ce suivi permettrait aussi d'évaluer les services rendus : réduction des îlots de chaleur, stockage de carbone, accueil de la biodiversité, comportement face aux pluies intenses. Des projets émergent — comme SylvaDense, lancé en 2024 par Plante & Cité — pour mesurer l'efficience réelle des « microforêts », très plébiscitées mais encore mal évaluées pour leur potentiel de refroidissement, de stockage carbone ou encore de fréquentation de la faune (*lire l'encadré ci-dessus*).
Renaturer en milieu urbain dense demande d'accepter des temporalités très différentes de l'agenda politique. Et, même si cela peut sembler évident, insiste Christelle Neaud, *« préserver reste aujourd'hui toujours plus efficace. Car renaturer en ville, c'est beaucoup d'incertitudes, quand ne pas artificialiser permet de laisser vivre des sols déjà vivants. »* ■

CEREMA

« Renaturer en ville, c'est beaucoup d'incertitudes, quand ne pas artificialiser permet de laisser vivre des sols déjà vivants »

Christelle Neaud, responsable d'études en écologie urbaine au Cerema

La culture du caoutchouc sous pression climatique

La production de ce matériau présent dans de nombreux objets du quotidien dépend de l'hévéa, un arbre tropical cultivé par 30 millions de petits planteurs, aujourd'hui menacé par le réchauffement climatique.

L'arbre à caoutchouc fait face à de nouveaux défis. Après deux siècles d'histoire industrielle, l'hévéa se cherche un avenir pérenne porté par la feuille de route pour sa culture durable élaborée par le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad). Cette sylviculture est en effet dans une situation instable. La hausse continue de la température globale de la planète menace ses conditions d'existence, tandis que ses usages par les humains ne cessent de croître. De fait, le caoutchouc naturel est omniprésent : tétines, gants, chaussures, adhésifs, préservatifs et bien sûr pneumatiques…

Mais ces objets souples du quotidien dépendent en grande partie de petits planteurs peu considérés, mal payés et peu soutenus par les sciences agronomiques. Sur la planète, 13 à 14 millions d'hectares d'arbres cultivés par près de 30 millions de petits cultivateurs produisent pas loin de 15 millions de tonnes de latex. Un produit naturel pas très courant. On compte seulement 2000 espèces végétales, principalement de la famille des euphorbes, qui contiennent dans leur écorce un réseau de cellules laticifères. *« Ces plantes sécrètent le latex comme moyen de défense contre les champignons et insectes pathogènes,* explique Dominique Garcia, chercheur au Cirad, responsable des études génétiques menées

CLAUDIUS THIRIET / BIOSPHOTO/ AFP

Récolte d'« Hevea brasiliensis » dans une forêt cambodgienne. Près de 15 millions de tonnes de latex sont produites chaque année dans le monde.

sur l'hévéa. *C'est une sorte de manteau protecteur généré entre l'écorce et le cambium, qui n'a donc rien à voir avec la sève* ». Le latex est une émulsion contenant de longues chaînes de polyisoprène, polymère composé à 90 % de carbone. *« Le caoutchouc est un produit industriel principalement composé de CO_2 atmosphérique, et c'est donc un puits de carbone »*, précise Dominique Garcia.

L'espèce qui fournit le latex est *Hevea brasiliensis*, le plus productif de la famille des hévéas qui comprend une dizaine de membres. Un nom scientifique qui met en avant l'origine amazonienne de la plante. Utilisé depuis des temps immémoriaux par les Incas, l'arbre a été redécouvert en 1735 par les naturalistes français Charles-Marie de La Condamine et François Fresneau (*lire l'encadré ci-dessous*). C'est au XIXe siècle que l'on tente une première fois la mise en culture d'un arbre que les « seringueiros » (ouvriers brésiliens chargés de collecter le latex) devaient chercher dans la forêt tropicale. Mais la terre brésilienne abrite aussi un champignon ravageur *Microcyclus* qui défeuille les arbres. D'où son implantation en Asie du Sud-Est, qui abrite désormais 82 % de la production mondiale. La Thaïlande en génère 34 %, suivie par l'Indonésie (14 %, mais en baisse du fait de la concurrence du palmier à huile et de l'occurrence d'une nouvelle maladie de feuilles) et le troisième pays est africain : la Côte d'Ivoire. *« Avec l'indépendance de l'Indochine dans les années 1950, les planteurs européens se sont rabattus sur l'Afrique,* raconte Laurent Vaysse, correspondant de la filière hévéa au Cirad. *La Côte d'Ivoire a particulièrement profité de l'aubaine depuis les années 2010 car elle a un fort réseau de petits producteurs qui exploitaient déjà le cacao.* »

CIRAD

« Le caoutchouc est un produit industriel principalement composé de CO_2 atmosphérique, c'est donc un puits de carbone »

Dominique Garcia, chercheur au Cirad, responsable des études génétiques menées sur l'hévéa

La capacité du matériau à résister aux fortes tensions

De fait, le latex est une affaire de paysans. 80 % de la production provient de petites exploitations, l'hévéa constituant une culture de rente d'autant plus profitable qu'il produit toute l'année entre 500 et 2000 kg de caoutchouc par hectare. Sa première transformation est par ailleurs simple et demande peu d'énergie. Le latex produit est stabilisé par traitement chimique à l'ammoniac, suivi d'un procédé par centrifugation pour en faire un concentré qui servira de matière première à la fabrication de produits « au trempé », comme les gants ou les préservatifs. La première transformation peut être effectuée à la ferme par le producteur (coagulation, laminage et séchage) pour fabriquer des feuilles de caoutchouc facilement transportables. *« Ce grade de caoutchouc est de grande qualité et donc réservé à des usages particuliers »*, note Laurent Vaysse. Cependant, l'essentiel de la première transformation est effectué sur des sites industriels dédiés où le latex coagulé est lavé, granulé et séché pour former des balles de caoutchouc de 33 kg du label TSR (pour *« technically specified rubber »*), majoritairement à destination des fabricants de pneus.

CHRONOLOGIE

Une longue histoire industrielle

1735 : description scientifique d'*Hevea brasiliensis* par les naturalistes Charles-Marie de La Condamine et François Fresneau à partir d'arbres découverts en Guyane.

1819 : Thomas Hancock découvre la mastication qui permet de donner toutes les formes voulues au latex.

1823 : Charles Macintosh invente l'imperméabilisation des tissus. Les vêtements de pluie sont nés.

1839 : Charles Goodyear met au point la vulcanisation qui permet de stabiliser les propriétés mécaniques.

1845 : brevet de conception d'un pneumatique par le britannique Robert William Thomson (également inventeur du stylo-plume rechargeable).

1876 : premier essai de plantation à Ceylan par le botaniste anglais Henry Wickham. Succès total. Les planteurs coloniaux commencent à diffuser l'arbre dans toute l'Asie du Sud-Est.

1895 : première voiture sur pneus.

1909 : premier brevet d'un caoutchouc synthétique.

1912 : la production asiatique de caoutchouc naturel dépasse celle du Brésil.

1915 : première apparition des élastomères synthétiques industriels.

1935-1950 : débuts de l'industrie des élastomères synthétiques, qui représentent 60 % de la consommation mondiale actuelle de caoutchouc.

1965 : instauration des normes techniques du caoutchouc naturel.

GILLES ROLLE/REA

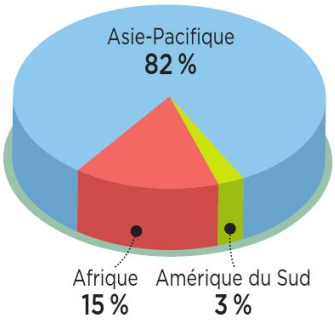
Le caoutchouc naturel entre dans la composition de nombreux produits manufacturés, comme les pneus des automobiles, mais constitue 100 % du train d'atterrissage des avions, en raison notamment de son élasticité et de sa résistance.

Car 70 % du caoutchouc naturel est utilisé dans l'industrie manufacturière du pneu (*voir l'infographie ci-contre*). La substance naturelle entre pour 17 % dans la composition des roues des voitures individuelles, 34 % dans ceux des camions et… 100 % dans les trains d'atterrissage des avions ! *« La pétrochimie est incapable de reproduire les longues chaînes carbonées de plusieurs milliers d'unités d'isoprène avec un enchaînement parfait dit en cis. De sorte que le caoutchouc synthétique n'arrive pas à supporter les fortes tensions que le produit naturel, lui, encaisse sans problème. Un pneu en caoutchouc synthétique éclaterait au deuxième atterrissage, si bien que le transport aérien dépend de petits agriculteurs qui ne prendront jamais l'avion »*, s'amuse Laurent Vaysse. Le caoutchouc naturel revêt donc une importance stratégique pour l'industrie en général, et le transport aérien en particulier. *« Il offre des caractéristiques qu'aucun élastomère synthétique ne peut égaler, telles que l'élasticité, la perméabilité, la résistance mécanique et l'isolation électrique »*, confirme-t-on chez le manufacturier Michelin.

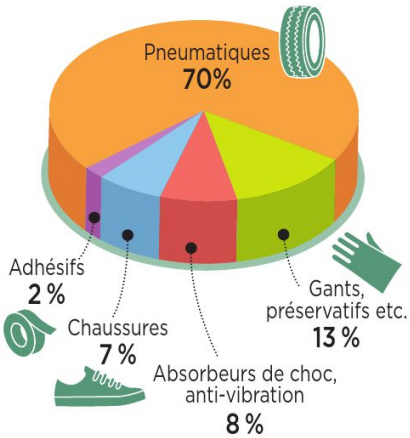
Le premier des objectifs de la feuille de route du Cirad, c'est d'anticiper la hausse des températures. L'arbre n'a jamais été planté dans des régions dont la température moyenne annuelle excède 28 °C. Il est donc menacé par la hausse de la température planétaire qui a déjà atteint 1,4 °C lors des 170 dernières années. Un climat plus chaud pourrait affecter les conditions optimales de développement de l'arbre, mais aussi favoriser l'émergence d'insectes ou de champignons pathogènes. *« Auparavant, on recherchait les gènes qui améliorent la production de latex, et donc les rendements,* expose Dominique Garcia. *Il nous faut désormais développer à partir des variétés actuelles de nouvelles variétés résistantes aux conditions climatiques, tolérantes aux maladies fongiques des feuilles qui pourraient apparaître, et adaptées au stress hydrique et aux différents sols tropicaux. »*

Pas question, malgré tout, d'abandonner l'amélioration des rendements. Pour les petits planteurs, la question est cruciale, d'autant que les cours mondiaux ne sont pour l'instant pas très élevés. Mais il s'agit aussi de faire face à l'accroissement de la demande mondiale d'environ 2 % par an, sans avoir à étendre les 13 à 14 millions d'hectares consacrés dans le monde à l'hévéa et qui n'ont pas augmenté depuis 2015. *« Tous ces facteurs doivent être pris dans des approches globales intégrant aussi des questions de développement humain, comme les migrations et les questions de santé humaine et environnementale »*, plaide Laurent Vaysse. ■

Loïc Chauveau



Répartition mondiale de la production de caoutchouc



Les différents usages industriels

BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : CIRAD 2024

Aliments ultratransformés

La crise sanitaire menace

Les preuves scientifiques sur la nocivité de l'alimentation ultratransformée se multiplient. Mais les autorités françaises n'ont pris aucune décision pour limiter sa consommation. Aux États-Unis, où 70 % des aliments disponibles dans les supermarchés sont ultratransformés, on parle déjà de crise sanitaire, avec la recrudescence des cas de diabète. Pour étudier les facteurs de risque, les chercheurs se fondent sur le degré de transformation des denrées.

Par Isabelle do O'Gomes

Londres, 19 novembre 2025. L'amphithéâtre du Royal College of Physicians (Collège royal de médecine), à Londres (Royaume-Uni), est comble ce soir, alors que la prestigieuse revue médicale britannique *The Lancet* y présente une série d'articles scientifiques alertant sur la transformation radicale de notre système alimentaire. « *Cela fait quatre ans, depuis le congrès de Tokyo, que nous préparons ces travaux,* témoigne Mathilde Touvier, coauteure de l'un des articles, et directrice de recherche Inserm en épidémiologie nutritionnelle. *Avec un objectif très clair : montrer que nous disposons désormais de suffisamment de preuves scientifiques sur les effets de l'alimentation ultratransformée et qu'il est temps de réfléchir à des mesures fortes en matière de santé publique.* » Cette alerte n'est pas la première : quelques jours plus tôt, un appel similaire avait été publié dans *Jama*, la revue médicale américaine de référence ; et en décembre dernier, l'Unicef s'était inquiété de la contribution de ce type d'aliments à la malnutrition chez les enfants.

Contre toute attente, c'est de l'autre côté de l'Atlantique, en Californie (États-Unis), que ces résultats ont eu leur premier véritable effet politique. Le 2 décembre 2025, lors d'une conférence de presse, le procureur de San Francisco, ▸

DÉFINITIONS

Huile hydrogénée : huile végétale traitée chimiquement pour la solidifier et la stabiliser.

Nutriment : substance essentielle à l'organisme, apportée par l'alimentation.

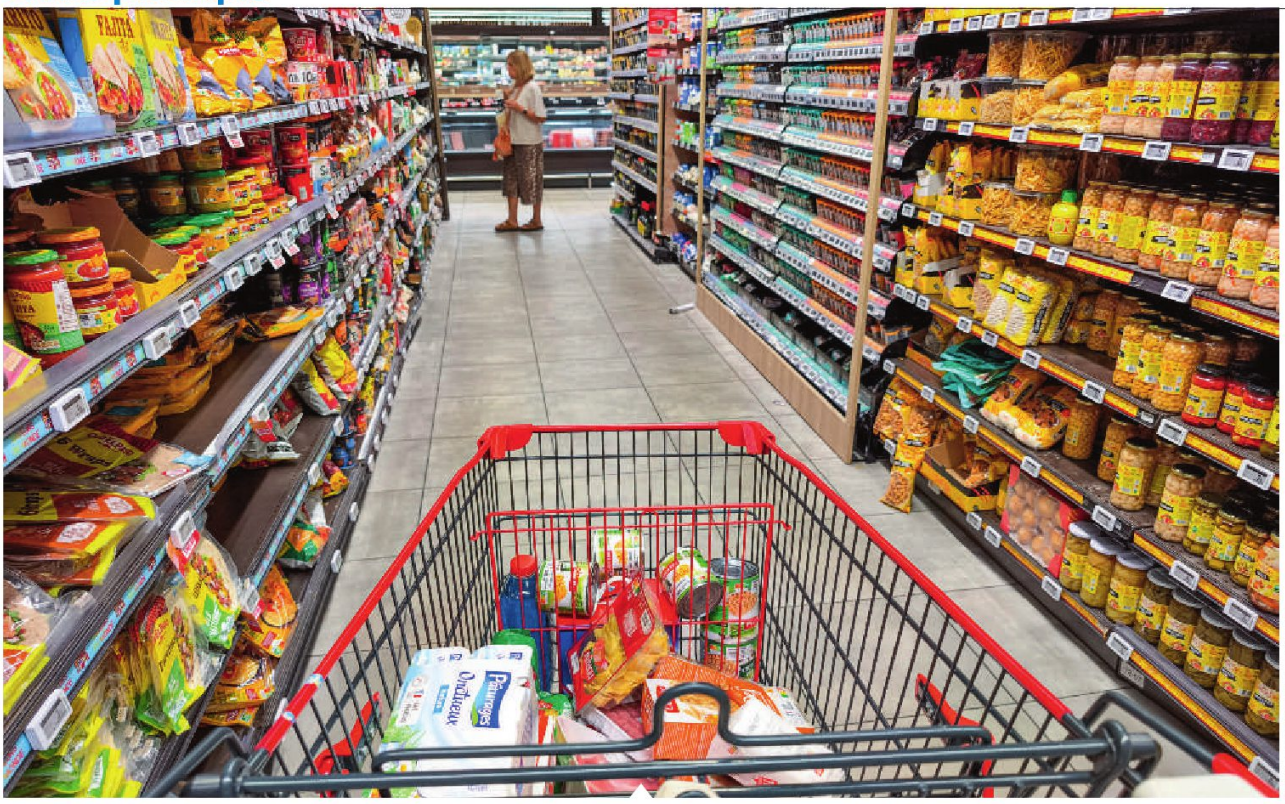
Sucre libre : sucre qui n'est pas naturellement enfermé dans la structure d'un aliment.

Graisses saturées : graisses d'origine animale, aussi présentes dans les huiles de palme et de coco.

SHUTTERSTOCK

La classification Nova, issue des travaux de l'épidémiologiste Carlos Monteiro, est une rupture conceptuelle dans la manière d'aborder les risques liés à une alimentation déséquilibrée. Elle divise les aliments en quatre niveaux selon leur degré de transformation. Ainsi, l'orange, aliment brut, est transformée lorsqu'elle est préparée en confiture ; dans un soda, elle ne représente plus que 10 % de la composition.

Santé publique



NICOLAS GUYONNET / HANS LUCAS

En France, les plus gros consommateurs d'aliments ultratransformés sont de jeunes hommes fumeurs et en surpoids.

David Chiu, a annoncé porter une action en justice contre dix géants de l'agroalimentaire — dont Kraft Heinz, Mondelez, Coca-Cola, PepsiCo, Nestlé, Kellogg's et Mars — accusés de promouvoir massivement des aliments ultratransformés. *« Un tournant scientifique a été franchi, motivant une partie de notre action judiciaire »*, précise Alex Barrett-Shorter, collaboratrice de l'avocat californien, en citant les publications de *The Lancet* et du *Jama*. Elle rappelle également des chiffres à l'échelle de son État : en vingt ans, les cas de stéatose hépatique — une maladie autrefois associée presque exclusivement à l'alcoolisme — ont presque triplé chez les enfants du « Golden State », surnom de la Californie. Dans le même temps, les dépenses médicales liées au diabète diagnostiqué ont fortement augmenté, passant de 27 à 40 milliards de dollars entre 2017 et 2021. *« Cette crise sanitaire n'est pas une fatalité, mais le résultat direct d'une offre alimentaire déséquilibrée »*, a souligné David Chiu lors de sa conférence de presse, citant un chiffre révélateur : 70 % des aliments disponibles dans les supermarchés américains sont aujourd'hui ultratransformés.

« Penser que cette problématique ne concerne que les États-Unis serait une erreur », explique Anthony Fardet, chercheur à l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae). Dans une analyse publiée en 2020 dans la revue *Food & Function*, il montrait avec ses collègues que, parmi plus de 24 932 produits emballés vendus en France, 67 % étaient ultratransformés. En moyenne, 31,1 % des calories consommées par les adultes français proviennent d'aliments ultratransformés, selon l'ENNS (Étude nationale nutrition santé). *« L'offre en supermarché n'a plus grand-chose à voir avec celle proposée à nos grands-parents,* complète Pierre Combris, directeur de recherche honoraire à l'Inrae. *Elle a transformé la composition de nos assiettes et conduit à une transition nutritionnelle.* » Théorisé au début des années 1990 par le chercheur américain Barry M. Popkin, ce concept de transition nutritionnelle décrit comment les sociétés modifient en profondeur leurs habitudes alimentaires au fil de leur développement économique.

En France, deux grandes transitions se sont succédé depuis le XIXe siècle :

PATRICK IMBERT / COLLÈGE DE FRANCE

« Nous disposons désormais de suffisamment de preuves scientifiques sur les effets de l'alimentation ultratransformée »

Mathilde Touvier, directrice de recherche Inserm en épidémiologie nutritionnelle

d'abord, une augmentation des apports caloriques, les quantités consommées grossissent sans changement notable dans la composition des repas ; ensuite, un appauvrissement progressif des assiettes en céréales et légumes secs, au profit d'une plus grande part de protéines animales, de graisses et de sucres. Elles se sont accompagnées d'une autre transition, d'ordre épidémiologique : *« Le passage progressif d'une prédominance des maladies infectieuses à une prévalence croissante des maladies chroniques non transmissibles, comme le diabète ou les maladies cardio-vasculaires,* précise Pierre Combris. *À terme, tous les pays sont concernés, à l'image de la transition démographique.* »

Des travaux fondés sur le degré de transformation des denrées

En 2009, dans la revue *Public Health Nutrition*, l'épidémiologiste brésilien Carlos Monteiro a proposé d'enrichir l'analyse de ce bouleversement nutritionnel avec un nouveau concept. Il a suggéré l'émergence possible d'un troisième marqueur de la transition nutritionnelle, qui ne se limiterait plus à la modification de la composition de nos assiettes en glucides, lipides et protéines, mais concernerait la consommation massive d'une nouvelle catégorie d'aliments dits ultratransformés : sodas, nuggets de poisson et de poulet, desserts lactés, plats prêts à consommer ou à réchauffer, ainsi qu'une fréquentation accrue des restaurants de type fast-food. *« Pour étudier les facteurs de risque pour la santé liés à la consommation de ces nouveaux aliments, nous avons choisi de ne plus nous fonder sur l'apport en sucre, en graisse ou en sel, mais sur le degré de transformation des denrées »*, explique-t-il. Avec son équipe, il a ainsi élaboré la classification Nova (« nouvelle » en portugais, *voir l'illustration p. 65*).

BASE DE DONNÉES

Open Food Facts décrypte nos courses

Créée en 2012, Open Food Facts est une base de données gratuite et en *open source*, qui recense les informations disponibles sur les produits alimentaires commercialisés en France. Inspirée du modèle collaboratif de Wikipédia, elle est accessible grâce à une application mobile du même nom. Une fois qu'elle est installée sur un smartphone, il suffit de scanner le code-barres présent sur l'emballage d'un produit pour connaître son Nutri-Score, son classement Nova, la liste des ingrédients, ou encore un indicateur environnemental. Une manière efficace de découvrir ce que cache un emballage, au-delà des photos alléchantes. Soutenue par des financements publics et privés, cette base est également utilisée par des scientifiques.

Quand les substituts remplacent les ingrédients bruts

SHUTTERSTOCK

Fabriquée en usine, la crème dessert au chocolat peut contenir plus de 12 ingrédients. Faite maison, elle se compose de seulement cinq aliments bruts.

À partir de 2013-2014, l'intérêt de la communauté scientifique pour ce concept a fortement augmenté. Des épidémiologistes, qui observent depuis des années — parfois des décennies — les habitudes alimentaires de milliers de personnes, ont alors utilisé la classification Nova pour tester l'hypothèse brésilienne. Parmi ces études, on peut citer la cohorte SUN en Espagne, Framingham aux États-Unis, Elsa au Brésil, NutriNet-Santé en France, UK Biobank au Royaume-Uni, Moli-Sani en Italie ou encore Lifelines aux Pays-Bas. *« Ces travaux convergent vers le même constat : la consommation quotidienne d'aliments ultratransformés est associée à un risque accru de maladies chroniques, comme le diabète de type 2, l'obésité, les maladies cardio-vasculaires et même les symptômes dépressifs »*, remarque Mathilde Touvier, responsable de la cohorte NutriNet-Santé.

Un risque cardio-vasculaire et d'obésité démontré

Cependant, ces recherches sont toutes épidémiologiques. Or, pour établir un consensus solide, il faut aussi des travaux expérimentaux et des essais cliniques, plus rares mais indispensables. Le plus récent, publié en 2025 dans *Cell Metabolism*, portait sur 43 hommes en bonne santé ayant suivi successivement un régime ultratransformé puis peu transformé — ou l'inverse — avec un apport calorique équivalent. *« À calories égales et adaptées aux besoins physiologiques*

RÉGLEMENTATION

Europe–États-Unis : la bataille des additifs

Pour améliorer la qualité de l'alimentation, informer et réguler sont des leviers efficaces. C'est le constat dressé par Julie Chapon, cofondatrice de l'application mobile Yuka, qui attribue aux produits une note de 1 à 100. Installée aux États-Unis, elle observe qu'en moyenne les produits américains contiennent 3,14 additifs, contre 1,87 en France. À produit équivalent, la composition peut varier : les céréales Kellogg's K vendues aux États-Unis contiennent ainsi le BHT (E321), *« un additif controversé absent de la recette française »*. Parmi les 50 additifs les plus préoccupants, *« 38 % ne sont soumis à aucune limite d'usage aux États-Unis, contre 14 % dans l'Union européenne »*. Et lorsqu'un additif est autorisé des deux côtés de l'Atlantique, *« la réglementation américaine est généralement plus souple »*. Le sulfate d'aluminium et de sodium (E521), par exemple, est autorisé dans tous les produits aux États-Unis comme agent texturant, alors qu'il est limité en Europe à certains produits spécifiques, comme les fruits confits. *« Les consommateurs européens exercent une pression forte poussant les fabricants à reformuler et les politiques à agir. Le même mouvement émerge désormais aux États-Unis »*, conclut-elle.

des volontaires, le régime ultratransformé a entraîné une prise de poids et une hausse du ratio LDL/HDL ["bon" et "mauvais" cholestérol], *deux indicateurs respectivement d'un risque d'obésité et d'un risque cardio-vasculaire »*, rapporte Romain Barrès, responsable de l'étude, qui conclut : *« La qualité des calories ingérées a bien un impact sur la santé. »*

Qu'ont de particulier ces calories ? *« Elles ne sont plus élaborées à partir d'une recette de cuisine à base d'aliments bruts (Nova 1) ou d'ingrédients culinaires (Nova 2), mais issues d'une formulation qui associe différents types de substituts issus de processus industriels et moins chers que des aliments bruts »*, analyse Carlos Monteiro. Pour l'illustrer, le scientifique brésilien prend l'exemple de céréales chocolatées pour le petit déjeuner. Le sucre peut être partiellement remplacé par du sirop de glucose, la farine par de l'amidon de blé, la matière grasse par des huiles hydrogénées, le lait par des protéines de lait et le chocolat par un arôme. Or, l'assemblage de ces ingrédients ne reproduit ni le goût, ni la texture, ni la couleur des céréales d'origine. On y ajoute donc des arômes et des additifs (colorants, émulsifiants, stabilisants, gélifiants…) qualifiés de *« cosmétiques »* par les scientifiques, afin de les distinguer des additifs indispensables à la conservation ou à la sécurité microbiologique.

Phillip Baker, coauteur de la série de *The Lancet*, a calculé qu'il est plus rentable pour l'industrie agroalimentaire de produire ce type d'aliments. Leur fabrication connaît donc une expansion rapide, au détriment des systèmes alimentaires locaux et des régimes traditionnels. Ainsi, le chiffre d'affaires annuel mondial du secteur est passé de 1500 milliards de dollars en 2009 à 1900 milliards en 2023, *« porté par un marketing particulièrement agressif,* précise le chercheur australien. *En 2024, Coca-Cola, PepsiCo et Mondelez International ont consacré ensemble 13,2 milliards de dollars à la publicité, soit près de quatre fois le budget opérationnel de l'Organisation mondiale de la santé »*.

Une « matrice alimentaire dégradée »

Or, ces formulations industrielles contiennent plus de nutriments associés à un risque accru de maladies chroniques, comme les sucres libres et les graisses saturées, et moins de nutriments protecteurs (fibres, vitamines, minéraux…), ainsi que l'a pointé une méta-analyse publiée en 2021 dans *Nutrients*. Mais ce n'est pas tout, constate Benoît Chassaing, directeur de recherche à l'Institut Pasteur, à Paris : *« Nos travaux montrent que certains additifs, tels que les émulsifiants, peuvent modifier la diversité de notre microbiote intestinal et favoriser un microbiote en mauvaise santé promoteur de pathologies chroniques. »*

LYDIE LECARPENTIER/REA

Les industriels ne sont pas tenus de révéler la composition exacte de leurs produits (ici, une chaîne de production de biscuits dans une usine à Montauban).

Anthony Fardet observe que ces aliments présentent aussi une *« matrice alimentaire dégradée »*, en raison des modifications physiques et chimiques importantes subies lors de leur préparation, telles que le fractionnement (*cracking*) de l'aliment en ses briques élémentaires, la cuisson-extrusion ou le soufflage. Il a théorisé ce concept dans un article paru en 2022 dans *European Journal of Nutrition*.

En juin 2025, des travaux présentés dans *Nature Metabolism* ont fourni une base expérimentale à ces recherches : des études *in vivo* chez l'humain ont montré que le type de texture des pois chiches mangés — entiers ou complètement broyés — influençait nettement les réponses digestives et métaboliques. Les préparations, ayant détruit entièrement la paroi cellulaire végétale des légumineuses, entraînaient une digestion plus rapide et perturbaient les réponses physiologiques de l'organisme. Parallèlement, le biologiste Romain Barrès a remarqué chez ces mêmes volontaires, après trois semaines d'alimentation ultratransformée, une baisse de la sécrétion de l'hormone GDF-15 (Growth Differentiation Factor-15), qui régule la sensation de faim et limite naturellement la prise alimentaire, confirmant ainsi l'existence de ces perturbations physiologiques.

Par ailleurs, il a noté *« davantage de phtalates (plastifiants présents dans les emballages alimentaires) dans le sang et le liquide séminal des participants »*. Or, ces substances étrangères à l'organisme, dites xénobiotiques, sont aussi des perturbateurs endocriniens. *« Par les procédés industriels utilisés pour les fabriquer, par leur formulation (et notamment leur teneur en additifs), et par le fait qu'ils peuvent rester longtemps emballés et même être chauffés et consommés directement dans leurs barquettes plastiques, ces produits cumulent le risque de contenir ces xénobiotiques. C'est d'ailleurs un axe de recherche majeur de notre laboratoire »*, complète Mathilde Touvier.

Un appel pour faire évoluer la législation

Face à l'accumulation de ces résultats scientifiques, les autorités sanitaires françaises recommandent, depuis 2019, de limiter la consommation d'aliments ultratransformés, sans toutefois envisager une régulation de l'offre alimentaire, déplore Serge Hercberg. *« La Stratégie nationale pour l'alimentation, la nutrition et le climat, publiée en février, n'a pris aucune décision pour limiter leur consommation. »* Cette position du gouvernement s'appuie sur le rapport de l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) qui *« identifie des signaux suggérant un lien entre la consommation de tels aliments et un risque plus élevé de développer des maladies chroniques »*, tout en appelant à mieux définir la notion d'ultratransformation. Un appel entendu par les experts réunis au Collège royal de médecine, à Londres, qui viennent de lancer un consortium international de recherche sur ce thème afin de faire évoluer la législation. ■

SUBSTITUTS ALIMENTAIRES

L'ultratransformé touche aussi les véganes

Dans la jungle de l'ultratransformé, une catégorie passe souvent inaperçue : les substituts végétaux de viande et de lait, consommés notamment par les végétaliens. Des travaux publiés en 2021 dans *The Journal of Nutrition* montrent que ces derniers consomment davantage d'aliments ultratransformés que les omnivores. Une étude menée chez des étudiants allemands, parue dans *Scientific Reports* en 2025, indique que 51 % des substituts de lait et 89 % des substituts de viande consommés par ces jeunes sont des aliments ultratransformés. Si, selon ces travaux, ces produits sont moins riches en graisses saturées et présentent une densité énergétique plus faible, ils sont aussi plus pauvres en protéines et en certains micronutriments essentiels.

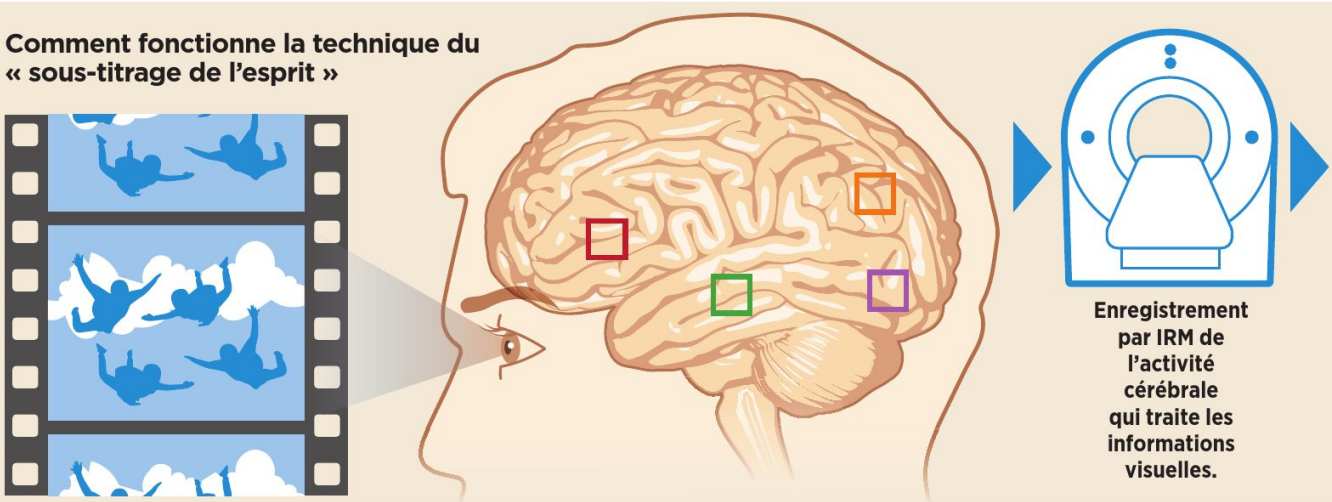
Les neurotechnologies décryptent nos pensées

Implants cérébraux, IRM, EEG… Couplées à l'intelligence artificielle, les neurotechnologies franchissent un cap : elles parviennent désormais à décoder des images mentales, brouillant encore plus la frontière entre prouesse médicale et intrusion dans nos pensées.

Rien de plus secret que nos pensées… mais plus pour longtemps. Car les neurotechnologies avancent à toute vitesse, éclairant le moindre coin d'ombre de notre esprit. Désormais, il est possible de deviner le mouvement qu'une personne paralysée voudrait réaliser ou de décoder la parole de celles qui ne peuvent plus parler. Comment ? Grâce à une panoplie de dispositifs sondant notre activité cérébrale, qu'ils soient invasifs — implants cérébraux — ou non invasifs, comme l'électroencéphalographie (EEG) ou l'imagerie par résonance magnétique (IRM). Ainsi récoltées dans le cerveau, ces données sont ensuite analysées par des intelligences artificielles (IA) de plus en plus performantes, qui réussissent à « lire » ce que l'on pense et à « voir » ce que l'on imagine.

L'exemple le plus frappant de ces récentes avancées est une technique nommée « sous-titrage de l'esprit » (*mind captioning*, en anglais) dévoilée en novembre dernier. Elle permet de générer des sortes de sous-titres de nos pensées visuelles, ce à quoi l'on pense, sans utiliser le langage. Traduisant ainsi ces images de l'esprit en texte, comme on pourrait le faire pour raconter un film à un malvoyant. *« Le but principal de cette méthode est de comprendre comment le cerveau se représente l'information visuelle, afin de mieux élucider les mécanismes cérébraux,* explique son créateur, Tomoyasu Horikawa, chercheur dans l'entreprise japonaise de télécommunications NTT. *Mais il a été très intéressant de découvrir que ce sous-titrage réussit à générer une description textuelle d'un contenu visuel sans même utiliser le réseau neural impliqué dans le langage.* »

Comment fonctionne la technique du « sous-titrage de l'esprit »



Enregistrement par IRM de l'activité cérébrale qui traite les informations visuelles.

Son approche, présentée dans la revue *Science Advances,* repose sur une IA qui analyse une séquence d'images et en génère une description sous la forme de sous-titres. Ce modèle de langage est entraîné pour ajouter progressivement des mots décrivant les éléments d'une image et la manière dont ces éléments interagissent (par exemple, l'interaction entre une personne et un chien). Mais, à la différence de ChatGPT ou Llama, ce modèle ne prédit pas seulement le mot suivant dans une phrase, mais aussi ceux qui manquent, en y ajoutant des mots-clés décrivant l'image. Cette méthode, nommée modélisation de langage masqué (ou *masked language modeling*, MLM), ajoute pas à pas toutes les descriptions nécessaires dans une même phrase pour avoir une bonne idée de ce qui passe à l'écran. Ces phrases associées à des séquences d'images ont ensuite été utilisées pour entraîner une autre IA qui devait les associer à l'activité cérébrale d'une personne en train de regarder ces mêmes images. Pour cela, Tomoyasu Horikawa a utilisé l'IRM fonctionnelle, technique non invasive qui permet d'analyser le flux sanguin dans le cerveau et savoir ainsi quelles aires sont activées. Grâce à cet entraînement, le logiciel parvenait à inférer les images que l'utilisateur observait à partir de son activité cérébrale et à identifier la vidéo regardée, avec un taux de réussite bien supérieur à celui qui serait dû au pur hasard. Dit autrement, les sous-titres générés à partir de l'activité cérébrale du participant sont comparés à ceux générés par l'IA pour décrire ces mêmes vidéos, et ainsi trouver à quelle vidéo les sous-titres cérébraux correspondent, et donc quelle vidéo la personne regarde. Chose étonnante, ces résultats peuvent être obtenus même sans prendre en compte l'activité issue des régions impliquées dans le langage, c'est-à-dire que c'est vraiment la pensée visuelle qui est décodée. Plus intrigant encore, cette méthode parvient à dévoiler les images qu'un participant visualise en se souvenant d'une des vidéos observées précédemment, offrant un accès possible à notre imagination. « *Ce* mind captioning *est probablement une révolution supplémentaire aux techniques déjà existantes,* affirme Hervé Chneiweiss, chercheur au Centre de neuroscience de Sorbonne Université et président du comité d'éthique de l'Inserm. *Ce qui était possible avec des systèmes implantés en contact direct avec le cerveau devient possible maintenant même avec des systèmes externes très lents, comme l'IRM fonctionnelle, qui nécessite deux à trois secondes pour capturer une image.* »

NTT

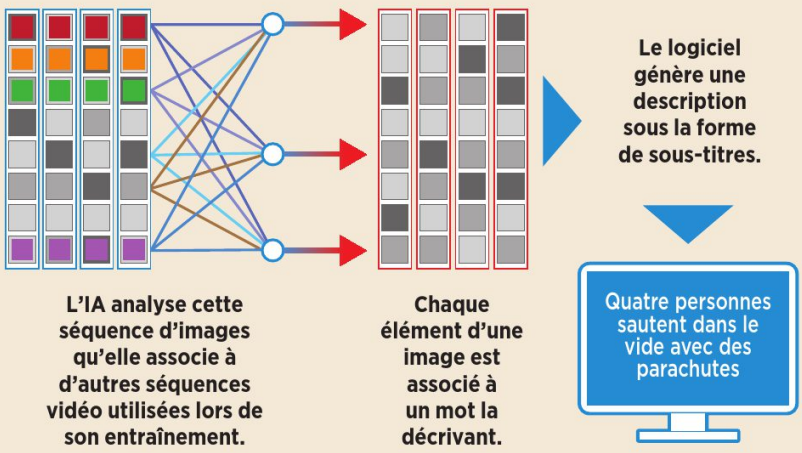
« Ces sous-titrages sont une interprétation de la pensée de la personne, mais pas forcément sa pensée réelle »

Tomoyasu Horikawa, chercheur dans l'entreprise japonaise de télécommunications NTT

Une tendance à générer les descriptions les plus typiques

Cette révolution, fruit de l'intelligence artificielle, s'accompagne nécessairement de limites. « *Ce modèle de sous-titres peut avoir des biais, comme une tendance à générer les descriptions les plus typiques. Par exemple, si la personne voit des images qui montrent une personne qui mord un chien : dans son entraînement, le modèle a probablement vu plus souvent l'interaction inverse, c'est-à-dire un chien qui mord une personne, et donc il pourrait se tromper et utiliser cette information plus récurrente lors de son interprétation de l'activité cérébrale,* illustre Tomoyasu Horikawa. *Tous les modèles ont des biais en fonction des données utilisées pour leur entraînement, on ne peut pas l'éviter complètement. Donc on doit bien comprendre que ces sous-titrages sont uniquement une interprétation de la pensée de la personne, mais pas forcément sa pensée réelle.* »

Une autre étude, publiée en août 2025 dans *Cell*, montre que même les pensées les plus intimes ne sont plus à l'abri. Des chercheurs de l'université Stanford, aux États-Unis, ont mis en évidence que les implants cérébraux normalement utilisés pour décoder la parole peuvent aussi « lire » ce que l'on pense. Or, des dizaines de personnes dans le monde portent actuellement l'un de ces dispositifs, principalement pour aider celles qui sont paralysées à communiquer. Ces



BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : SCIENCE ADVANCES

interfaces cerveau-machine enregistrent l'activité des neurones qui contrôlent les muscles nécessaires à la parole, et infèrent ce que la personne veut dire. L'utilisateur doit donc vouloir exprimer quelque chose (faisant l'effort d'essayer de remuer ses muscles) pour que cela soit transcrit par le dispositif. Mais cette nouvelle recherche montre que ces dispositifs peuvent aussi décoder la « parole interne », celle qu'on entend par exemple lorsqu'on lit en silence ou qu'on essaye d'enregistrer une information en la répétant dans sa tête.

Selon cette étude, cette parole interne (ce que les utilisateurs pensent) et la « vraie » parole (ce qu'ils veulent dire) utilisent les mêmes neurones, dans la même région du cortex lue par l'implant, mais à des niveaux différents. La différence étant que la parole interne et la lecture en silence entraînent une activation plus faible de ces neurones. Comme s'il y avait un seuil d'activité à partir duquel ces neurones comprennent que l'utilisateur veut vraiment dire ces mots à voix haute, envoyant alors cette information vers les muscles impliqués dans la parole.

F. GUENET/DIVERGENCE

« Il est hors de question de vouloir chercher à interdire ces neurotechnologies. L'idée, c'est de les utiliser de façon responsable »

Hervé Chneiweiss, chercheur au Centre de neuroscience de Sorbonne Université et président du comité d'éthique de l'Inserm

Un mot de passe pour protéger ses pensées

Pour protéger les pensées intimes des participants de l'étude, les chercheurs ont mis en place un système de sécurité activé par un mot de passe. Le décodage de l'implant ne s'active que si l'utilisateur pense à ce mot, donnant ainsi son approbation pour que sa parole, y compris sa parole interne, soit décodée. Un premier pas vers la recherche d'un équilibre entre l'utilisation de neurotechnologies à des fins thérapeutiques et la nécessaire sauvegarde de l'intimité de l'utilisateur. *« Selon l'OMS, 45 % de la population mondiale est affectée par une maladie du cerveau, allant de choses très simples, comme la migraine, jusqu'à des choses plus graves comme les maladies neurologiques ou les maladies mentales, et une partie de la solution repose sur des neurotechnologies,* rappelle Hervé Chneiweiss. *Donc, il est hors de question de vouloir chercher à les interdire. L'idée, c'est de les utiliser de façon responsable. »*

Désormais, avec l'IA, des dispositifs bien plus modestes pourraient présenter le même risque pour l'intimité. C'est le cas de bandeaux et autres appareils à EEG, qui mesurent l'activité cérébrale dans un but récréatif. Ces électrodes se retrouvent maintenant dans des casques de réalité virtuelle et même dans des oreillettes, et servent à analyser le niveau de concentration ou de fatigue, par exemple pour améliorer les performances d'un joueur. *« Dans cinq ans, ce qu'il est possible de faire aujourd'hui avec des procédés plus invasifs pourra probablement être réalisé avec des écouteurs dans les oreilles, parce qu'on aura la puissance de calcul et la capacité de décodage nécessaires »*, alerte Hervé Chneiweiss. Il est donc urgent de réguler ces nouvelles neurotechnologies, et s'assurer que nos pensées restent secrètes. ■ **Nicolas Gutierrez C.**

RECOMMANDATION

L'Unesco tente d'imposer un cadre éthique

Le 12 novembre dernier, l'Organisation des nations unies pour l'éducation, la science et la culture (Unesco) a adopté à l'unanimité les premières recommandations pour réguler les données générées par les neurotechnologies. Elles préconisent, par exemple, que ces dispositifs ne doivent pas être utilisés pour améliorer les performances éducatives d'enfants en bonne santé, ni pour surveiller la productivité d'un employé sans son accord. *« C'est la première fois qu'il y a un texte à portée légale sur le sujet »*, se félicite Hervé Chneiweiss, qui a présidé le comité à l'origine de ces recommandations. Elles posent un cadre clair pour permettre de réguler les données collectées dans un but récréatif, en particulier si elles risquent de permettre d'identifier une personne : *« On pourrait voir que votre profil d'activité est différent du mien,* précise-t-il. *Et si vous vous êtes enregistré pour un jeu vidéo et que vous avez donné votre nom, vos coordonnées, on pourrait utiliser votre activité pour vous identifier. »* En France, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques a commencé l'analyse de ce sujet dans le but de l'inscrire dans les États généraux de la bioéthique en avril.

Modèle de peau humaine « ex vivo » produit par Genoskin et utilisé par les laboratoires pour faire des essais cliniques.

GENOSKIN

Donner une seconde vie à la peau

Une biotech toulousaine recycle des échantillons de peaux humaines issus de chirurgies plastiques pour tester l'efficacité et la toxicité des médicaments et des vaccins. Objectif : devenir une alternative aux expérimentations sur les animaux.

Dans un bloc opératoire du CHU de Toulouse, une abdominoplastie touche à sa fin. L'excès de peau qui vient d'être retiré du patient est soigneusement mis de côté. D'ordinaire voué à la destruction, ce morceau de peau va être collecté pour devenir, dans quelques heures, un outil précieux pour la recherche. La peau est récupérée par des transporteurs spécialisés puis arrive sous 24 heures maximum après la chirurgie dans les laboratoires de Genoskin, une biotech spécialisée dans le recyclage d'échantillons de peau. Réceptionnée au centre Pierre-Potier de Toulouse, une pépinière d'entreprises innovantes où est installée Genoskin depuis 2011, cette peau, composée de l'épiderme, du derme et de l'hypoderme, est prise en charge par une équipe de production. Elle est dégraissée, biopsiée, désinfectée puis mise en culture, afin de devenir un modèle fonctionnel qui permettra de tester l'efficacité et la tolérance des traitements médicaux, comme des anticorps monoclonaux injectables.

« Nous avons créé un gel qui vient emprisonner la biopsie de peau et permet de laisser sa surface au contact de l'air. Cela permet aussi de faire une tension mécanique pour ne pas que le morceau de peau se referme sur lui-même »,

explique Pascal Descargues, P-DG de Genoskin. C'est lors de son post-doctorat à l'université de Californie à San Diego (États-Unis) que ce dernier, alors chercheur en maladie génétique de la peau, prend conscience des limites éthiques et scientifiques des modèles animaux. Il se tourne alors vers une matière jusque-là négligée : les déchets chirurgicaux issus d'opérations d'abdominoplasties, en pleine expansion avec l'épidémie mondiale d'obésité.

La peau prélevée reste « vivante » pendant sept jours

L'innovation de l'entreprise réside dans un milieu de culture qui permet de nourrir le tissu et de préserver les cellules. Grâce à cette technologie brevetée exclusive en France, la peau est gardée vivante pendant sept jours et les caractéristiques immunologiques du donneur sont conservées. *« Pour que les organes et tissus humains soient réellement utiles en recherche, ils doivent rester vivants : ni congelés, ni conservés au réfrigérateur. Comme nous, ils vivent à 37 °C »*, précise Pascal Descargues.

Les matrices sont ensuite proposées aux clients de Genoskin sous forme de kits, prêts à l'emploi. Certains sont composés de l'épiderme et du derme, d'autres incluent l'hypoderme. Chaque kit est accompagné d'informations précises sur le donneur : âge, sexe, type de peau et site anatomique. *« Il y a un cadre réglementaire très strict. Nous rémunérons les hôpitaux non pas pour les échantillons de peau fournis, mais pour le temps passé à les obtenir. C'est une compensation financière minime qui est uniquement associée au dédommagement de la prestation »*, précise Benoît Lavabre, responsable de la biobanque de Genoskin. Le client, lui, n'achète pas la peau mais la matrice qui va avec, en fonction de ses critères spécifiques : *« Nous connaissons les plannings opératoires à l'avance et nous nous positionnons en fonction des critères de sélection des études. Par exemple, nous pouvons avoir besoin d'un phototype particulier, d'un certain âge ou d'un sexe spécifique. Cela nous permet de répondre à des critères d'inclusion très précis et très sélectifs. »* Pour autant, la solution proposée connaît encore certaines limites. *« Il manque un composant qui est jugé essentiel dans de plus en plus de maladies, c'est le système nerveux périphérique,* explique Vincent Flacher, directeur de recherche à l'Institut de biologie moléculaire et cellulaire (IBMC) du CNRS. *Lorsqu'un chirurgien prépare cette pièce de peau, les axones des neurones sensoriels sont coupés, et ce qu'il reste, ce sont des fragments qui ne vont plus remplir leurs fonctions.* » Cela pose problème, notamment pour des maladies comme le psoriasis ou la dermatite atopique, où les neurones peuvent influencer l'inflammation cutanée : *« Les neurones ne sont probablement pas à l'origine de ces maladies,* concède le chercheur, *mais il pourrait y avoir des interactions entre le système immunitaire et le système nerveux qui régulent l'inflammation et pourraient l'exacerber.* » Pour Vincent Flacher, le futur de la recherche réside donc dans *« la construction de modèles 3D innervés ou la réinnervation* in vitro *des explants »*.

Des clients dans l'industrie pharmaceutique et cosmétique

C'est justement le travail mené par Nicolas Lebonvallet, ingénieur de recherche au laboratoire Interaction épithéliums neurones de l'université de Bretagne occidentale, qui a mis au point avec son équipe, et après quinze années de recherche, un modèle unique de peau réinnervé par des neurones humains. *« Nous avons réussi à réintroduire des neurones sensoriels humains, issus de cellules souches de la peau provenant de déchets opératoires, dans un explant de peau »*, explique le chercheur. *L'objectif scientifique de ce modèle est de comprendre les interactions neurocutanées : non seulement la sensorialité, mais aussi les apports des neurones à la physiologie de la peau. Et, inversement, d'observer comment le tissu cutané contribue à l'innervation et à la composante sensorielle.* » Un modèle de peau désormais commercialisé par le laboratoire Bio-EC, pour des tests cosmétiques et pharmaceutiques.

GENOSKIN

Le fabricant d'échantillons de peau Genoskin développe depuis peu des tests de toxicité des biothérapies et des vaccins injectables contre des maladies.

Genoskin compte parmi ses clients de grands noms de l'industrie pharmaceutique (Sanofi, AstraZeneca), de la grande consommation (Colgate, Unilever) et des cosmétiques (L'Oréal, Estée Lauder, Yves Rocher, Shiseido). Ces derniers y ont recours pour tester les réponses immunitaires et les effets secondaires de leurs produits, bien avant les essais cliniques sur l'humain. Un gain de temps et d'argent précieux : *« Le développement d'un médicament prend entre 10 et 15 ans, coûte de 1 à 2 milliards d'euros et 90 % des projets sont en échec. Neuf molécules sur dix n'iront jamais sur le marché »*, argumente Pascal Descargues. Genoskin se décrit comme une *« gare de tri »*, capable de sélectionner les projets qui apportent les meilleurs résultats et d'éliminer ceux qui se révéleront toxiques pour l'humain. L'objectif est d'apporter des données fiables pour un développement de médicaments plus prédictif, mais aussi plus éthique.

L'entreprise a ainsi développé un vaste réseau de collecte de peau humaine avec des hôpitaux, des cliniques, ainsi que des biobanques et des laboratoires privés : *« Nous travaillons avec 17 sites aux États-Unis et 12 en France. Cela représente aujourd'hui un accès à plus de 2000 donneurs par an. »* De fait, Genoskin a profité d'un marché en plein essor, porté par l'évolution de la réglementation : depuis 2013, l'Union européenne interdit la vente de produits cosmétiques testés sur les animaux. L'Inde a suivi en 2014 comme plusieurs États américains, notamment la Californie. C'est dans ce contexte que d'autres acteurs se sont développés pour répondre à une demande croissante de modèles cutanés humains. C'est le cas de la société lyonnaise CTI Biotech, spécialisée dans le développement de peau humaine en impression 3D, ou de l'écossais TenBio, qui travaille comme Genoskin sur de la peau humaine native *ex vivo*. La marque L'Oréal avait, elle, créé Episkin dès 1997, un centre de recherche et d'innovation consacré à la reconstruction de peau humaine à partir de déchets opératoires.

Une extension aux domaines génomiques et protéomiques

Si, à son lancement, Genoskin testait majoritairement des cosmétiques et des médicaments dermatologiques, aujourd'hui, près de 60 % de ses clients proviennent du secteur biotech et pharmaceutique. *« Nous avons amélioré notre système pour lui permettre de subir des injections sous-cutanées ou intradermiques. Cela nous ouvre aujourd'hui aux biothérapies : des vaccins, de l'insuline ou des anticorps monoclonaux »*, se félicite Pascal Descargues.

Un repositionnement stratégique pour la biotech, qui propose désormais des tests menés en interne pour ajouter une couche d'analyse avancée : les échantillons permettent d'explorer différents types de données biologiques, grâce à des analyses omiques (gènes, ARN, protéines, métabolites…). Ces données sont ensuite étudiées avec des outils de bioinformatique, combinant méthodes statistiques et intelligence artificielle, afin d'identifier les gènes et les populations cellulaires les plus affectés par un produit ou un traitement. Ambition affichée : transformer le mode de développement des biothérapies et permettre l'administration autonome par injection sous-cutanée. *« Nous travaillons notamment avec des sociétés qui développent des dispositifs médicaux, tels que des seringues particulières, des auto-injecteurs, des micropompes ou des outils pour mesurer le glucose pour les personnes diabétiques »*, ajoute Pascal Descargues. Des solutions qui présentent un double avantage pour le chercheur : plus confortables pour les patients, mais également moins coûteuses pour la société.

Qu'ils soient *in vitro* ou *ex vivo*, la communauté scientifique s'accorde à dire que ces modèles de peau ne pourront pas remplacer les animaux à court terme. Mais ces innovations restent un pari scientifique, économique et éthique gagnant pour Genoskin. ■

Céline Labesque

HERVÉ HUCHON-GENOSKIN

« Nous travaillons avec 17 sites aux États-Unis et 12 en France. Cela représente un accès à plus de 2000 donneurs par an »

Pascal Descargues, P-DG de Genoskin

EXPÉRIMENTATIONS

Remplacer les modèles animaux

Si les explants de peau offrent un début de solution pour réduire l'expérimentation animale dans le secteur dermatologique, près de 3000 primates non humains étaient encore utilisés en France en 2022, sur un total de deux millions d'animaux. Mais depuis le Covid-19, les macaques destinés aux essais précliniques, venus principalement de Chine, se font rares, et leur coût a explosé : il est passé de 5000 à 30 000 euros l'unité. Le macaque est ainsi devenu un élément géostratégique, au cœur des rivalités internationales avec un risque majeur : voir l'Europe prendre du retard dans la recherche biomédicale. Pour pallier cette menace, un projet du CNRS prévoit l'extension d'un centre d'élevage près de Marseille, qui ambitionne d'héberger 1800 primates d'ici à 2030.

Les fromages blancs à la loupe

Ces produits laitiers, élaborés avec un lait écrémé pasteurisé, apportent une bonne dose de protéines et de calcium. Mais certains sont plus caloriques que d'autres et contiennent des additifs.

Fromage blanc, petit-suisse, yaourt grec… Ces produits laitiers sont des habitués de nos fins de repas. Mais depuis quelques années, on ne parle que du skyr au rayon frais. Ce produit laitier fermenté, phare en Islande, à la texture dense entre yaourt et fromage blanc, est désormais consommé par 42 % des Français, contre 17 % en 2021 (1). Sur les réseaux sociaux, de nombreux influenceurs, notamment dans le domaine du sport, vantent ses qualités nutritionnelles.

Diverses préparations possibles

Skyr, petit-suisse, fromage blanc sont tous des fromages frais, élaborés avec un lait écrémé pasteurisé et coagulé avec des ferments lactiques (*Streptococcus thermophilus*…), parfois encore avec des enzymes (présure), puis légèrement égouttés, soit dans des moules, soit par centrifugation mécanique, afin de séparer le caillé du lactosérum. Mis en pot avec son panier, le caillé donne un fromage de type faisselle. Battu, il devient un fromage blanc lisse et quand il est additionné de crème fraîche, un petit-suisse (2). Pour le skyr, l'égouttage est plus intense (ultracentrifugation), ce qui concentre davantage le produit en protéines. Fabriqué à l'origine à partir de lait de brebis, il existe désormais des versions au lait de vache et de chèvre (3).

2

portions de produits laitiers par jour sont recommandées pour un adulte, une portion équivalant à 150 ml de lait, 125 g de yaourt ou 30 g de fromage. Après 55 ans, 3 à 4 laitages sont conseillés.
(SOURCE: PNNS.)

Un riche apport en protéines

Un pot de skyr au lait de vache ou de brebis, ou un yaourt Hipro de

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

YAOURT GREC Yaourt fermenté traditionnellement égoutté. Certains yaourts dits à la grecque n'ont, eux, pas été égouttés mais épaissis avec de la crème ou des additifs (amidon, pectine).

LACTOSÉRUM Partie liquide qui reste après la coagulation du lait. Appelé aussi petit-lait, il est composé d'eau, de lactose, de protéines et de sels minéraux. Le lactosérum est valorisé dans l'industrie agroalimentaire (gâteaux, purées...).

LACTOSE Glucide présent dans le lait, appelé sucre de lait. Il se compose d'une molécule de glucose et d'une autre de galactose. Il est dégradé dans le tube digestif grâce à une enzyme, la lactase.

Danone (spécifiquement pensé pour les sportifs), en renferment près de 9,5 g/100 g (4). Toutefois, cette teneur en protéines rassasiantes est à nuancer. Elle n'est que de 2 à 3 grammes supérieure à celle d'un pot de fromage blanc de vache (100 g) allégé à 0 % ou 3 %, et est presque équivalente à deux petits-suisses de 60 g chacun (11 g de protéines). Les skyrs sont aussi plébiscités pour leur faible teneur en glucides, environ 3 %, principalement du **lactose**, contre 4 à 6 % pour les fromages blancs et les petits-suisses. Mais les formes aromatisées contiennent, elles, plus de sucres. Par exemple, le skyr nature Siggi's (100 g) en renferme 3,5 g, tandis que le même produit à la myrtille en compte 8,43 g. À noter enfin que certaines marques, comme Isey, ajoutent à la préparation une enzyme, la lactase, qui dégrade le sucre du lait, ce qui permet d'aboutir à des versions de skyr sans lactose.

Une bonne source de calcium

Le skyr en apporte 100 à 110 mg/100 g, le fromage blanc 120 à 240 mg/100 g (pour le fromage blanc Calin à 3,2 %, par exemple), soit 12 % à 24 % des besoins journaliers d'un adulte. En revanche, les petits-suisses, en raison de l'ajout de crème, en renferment légèrement moins (90 à 120 mg/100 g).

Le calcium aide à la minéralisation des os et des dents ainsi qu'à la régénération des tissus. En outre, une vaste étude britannique a démontré que la consommation supplémentaire chaque jour de 300 mg de calcium est associée à une réduction du risque de cancer colorectal (5). Le calcium agirait indirectement en étant capable de se lier aux acides biliaires pro-inflammatoires et aux acides gras libres dans le côlon, les empêchant d'endommager la paroi intestinale (6).

Attention aux excès de graisses

Selon le lait utilisé (vache, chèvre, brebis), il faut compter 0 à 2,5 grammes de matières grasses pour le skyr. Pour exemple, celui au lait de chèvre Soignon en apporte 0,5 g/100 g, le skyr de brebis de la marque Le Petit Basque, 2,5 g/100 g. Les petits-suisses, les yaourts grecs et certains fromages blancs étant enrichis de crème fraîche sont plus caloriques (85 à 140 kcal/100 g), avec des quantités de matières grasses plus importantes, mais variables. Pour exemple, le petit-suisse Gervais nature 9,5 % affiche 11,40 g de matières grasses pour deux petits pots de 60 g ; le petit Yoplait en compte 4,56 g pour la même quantité.

Bien les choisir

Si les skyrs peuvent aussi contenir différents additifs (épaississants, amidons modifiés, etc.), il faut savoir que les petits-suisses sont, eux, entourés d'un papier imbibé de conservateurs (sorbate de calcium ou de potassium). Par ailleurs, il existe des alternatives végétales, à base de soja, coco, ou amande qui imitent la texture du skyr. Elles peuvent aussi contenir des sucres ajoutés, des épaississants ou bien encore des arômes artificiels, ce qui n'a alors plus grand-chose à voir avec la recette originelle. Il faut donc veiller à bien lire les étiquettes pour choisir une option de qualité. ■

Sylvie Boistard

VANESSA GOUYOT Diététicienne-nutritionniste à Levallois-Perret (92)

Le skyr ne convient pas à tout le monde

« Le skyr est une belle mode, on en fait un aliment "healthy" alors qu'il est nutritionnellement équivalent à un fromage blanc, mais il est aussi deux fois plus cher. Il est très recherché par certains sportifs qui désirent augmenter leur masse musculaire. Mais ce produit est moins utile pour un coureur par exemple, qui a aussi besoin de matières grasses pour un marathon. Pour le reste de la population, il permet de varier les sources de produits laitiers, mais il contient trop de protéines pour les besoins quotidiens des enfants, qui ne doivent donc pas en consommer tous les jours. »

(1) Étude NielsenIQ, 2025.

(2) Les produits laitiers, Interprofession laitière française.

(3) Traditional and modern Nordic fermented milk products: a review, Narvhus J.A. et al, *International Dairy Journal*, 2023.

(4) OpenFoodfacts.

(5) Diet-wide analyses for risk of colorectal cancer: prospective study of 12,251 incident cases among 542,778 women in the UK, Papier K. et al, *Nature Communications*, 2025.

(6) Produits laitiers et cancer, réseau Nacre.

PEDICINI FOTOGRAFI / LA COLLECTION

Enfant attrapant au lasso un canard sauvage (IIIe-IVe siècle). Cette mosaïque romaine ornant la riche villa del Casale, en Sicile, illustre la place des enfants dans la vie quotidienne des familles aisées de l'Antiquité et leur représentation.

Enfance

Ce que l'archéologie raconte des premiers âges de la vie

Les enfants ont toujours été considérés par les historiens comme des figures secondaires des sociétés anciennes. Des chercheurs ont commencé à traquer leur présence dans les tombeaux, les objets du quotidien ou les représentations artistiques. Leur conclusion : ils n'ont jamais été des êtres négligeables, quelle que soit l'époque étudiée.

Par Marine Benoit

Si l'on pouvait voyager dans le passé tel que l'archéologie nous l'a dépeint, la carte postale que l'on enverrait à nos proches montrerait, pour sûr, nombre de temples, de palais, de statues, d'armes, de bijoux ou encore de poteries. On y aurait rencontré des souverains et souveraines, des prêtres, des guerriers et des travailleurs, dont il subsiste un peu partout les traces des ouvrages et les lieux de vie. En revanche, si l'on s'en tient là encore à ce que l'archéologie nous a toujours raconté du passé, nous n'y aurions croisé presque aucun enfant. Invisibles dans les récits historiques, rares dans les vitrines des musées, les enfants ont toujours été considérés comme des figures secondaires des sociétés anciennes. De là est née une idée tenace : de l'Europe du Nord à l'Orient, à travers toutes les époques où près d'un quart des enfants mourraient avant un an — autrement dit jusqu'à l'avènement de la médecine moderne au XX^e^ siècle —, l'attachement aurait été mesuré, presque résigné.

Pourtant, depuis les années 1980, dans le monde anglo-saxon puis en France, un champ de recherche s'est structuré autour de l'archéologie de l'enfance. En changeant de focale — c'est-à-dire en cessant de ne voir que les adultes, et plus particulièrement les élites —, les chercheurs ont commencé à repérer ce qui passait jusqu'ici inaperçu : des tombes minuscules, des outils adaptés à de petites mains, des empreintes de pas dans l'argile fraîche ou encore des graffitis maladroits sur les murs. L'enfant, souvent « présent par son absence », s'est alors mis à émerger. Avec lui, une évidence : il n'a jamais été un

CORENTIN DUJANCOURT, INRAP

Cette sépulture enfantine a été mise au jour dans une nécropole gallo-romaine réservée aux très jeunes enfants et mort-nés, à Auxerre (Ier-IIIe siècle).

être négligeable, quelle que soit l'époque à laquelle il a vécu. Pour les périodes les plus anciennes, les sources, bien qu'exclusivement archéologiques, sont déjà parlantes. *« On a retrouvé de nombreuses sépultures d'enfants du paléolithique qui montrent le soin apporté à ces petits êtres lorsqu'ils mourraient »*, affirme Valérie Delattre, archéo-anthropologue à l'Institut de recherches archéologiques préventives (Inrap) et spécialiste de la petite enfance. La plus connue d'entre elles est sans doute celle de l'enfant de la Madeleine, dans la vallée des Eyzies (Dordogne), qui renfermait encore le corps d'un petit magdalénien décédé il y a environ 10 000 ans à l'âge de 2 à 4 ans. *« Sa dépouille avait été enduite d'ocre et ornée d'une riche parure de coquillages perforés et de dents percées »*, détaille la chercheuse.

Chez les Grecs et les Romains, des pratiques funéraires à part

La préhistoire nous a aussi livré son lot d'empreintes, émouvants témoignages de la présence de ces bambins dans des lieux d'importance pour le groupe. Dans certaines grottes ornées notamment, comme celles d'El Castillo (nord de l'Espagne) ou de Gargas (Hautes-Pyrénées), de toutes petites mains ont été apposées sur les parois, laissant entendre que les enfants participaient aux gestes symboliques du groupe, si tant est que ces panneaux aient eu une portée rituelle. Nous avons enfin des traces qui n'évoquent rien de plus que leur passage sur cette terre, mais qui n'en sont pas moins touchantes : *« De simples empreintes de pas fossilisées, vestiges de la présence de ces petits bonshommes crapahutant aux côtés de leurs parents, peuvent être bouleversantes,* poursuit Valérie Delattre. *Il est en tout cas clair que, dès la préhistoire, les plus jeunes sont loin d'être mis à l'écart et font partie des êtres à protéger car ils assurent la pérennité du groupe. »*

C'est surtout au sujet de l'Antiquité que les interprétations se sont vues profondément renouvelées au cours des dernières décennies. Il faut dire que les traces matérielles — et surtout leur rareté — n'ont pas toujours mis les archéologues sur la bonne piste. *« Alors que les courbes paléodémographiques montrent*

Jouets de l'Antiquité grecque (à gauche, poupée articulée en terre cuite du Ve siècle avant notre ère) et égyptienne (au centre, poupée de chiffon du IVe siècle), et de la Renaissance (à droite, soldat miniature en pierre du XVIe siècle).

GRAND PALAIS RMN - GETTY IMAGES

bien une forte mortalité dans la première année de vie des populations, les cimetières livrent moins de nourrissons qu'attendu, explique Olivier Blin, archéologue et spécialiste de la Gaule romaine à l'Inrap. *C'est pourquoi pendant longtemps, on en a conclu que les plus petits n'étaient pas toujours inhumés, voire qu'ils ne faisaient pas l'objet de rites.* » Il fallait en réalité les chercher ailleurs. Dans le monde gréco-romain, les nourrissons étaient souvent enterrés selon la pratique dite de l'enchytrisme : placés à l'intérieur de vases pansus, en position fœtale, ils étaient déposés dans l'habitat, le jardin ou le long des chemins. *« Morts trop tôt, parfois avant même d'avoir reçu un nom, ils ne pouvaient bénéficier des rites de passage et demeuraient "entre deux mondes",* complète Valérie Delattre. *Alors on les gardait dans le cercle domestique, comme pour les protéger. Perdre un bébé, c'était perdre l'avenir.* » Aujourd'hui, la quasi-totalité de ces sépultures domestiques peu profondes ont disparu. Parfois, les plus jeunes ont aussi été enterrés dans des espaces qui leur étaient dédiés.

À Auxerre (Yonne), des fouilles réalisées en 2024 sous la place du Maréchal-Leclerc ont mis au jour une nécropole gallo-romaine datée du Ier au IIIe siècle de notre ère, réservée aux très jeunes enfants et mort-nés. *« Là encore, ce traitement différencié exprime un statut particulier »,* poursuit Olivier Blin. Nombreuses sont d'ailleurs ces tombes d'enfants à avoir livré des objets protecteurs — des amulettes, des colliers ou encore des fibules miniatures — pensés spécialement pour les petits. *« On a longtemps considéré que les dépouilles des nourrissons et des fœtus étaient, pour parler crûment, jetés sur des tas de fumier,* lance Olivier Blin. *Nous étions totalement passés à côté de ces tombes, de ces vases qui rappellent le ventre et dans lesquels la famille matérialisait son amour et sa peine.* »

AKG IMAGES

ANTIQUITÉ

Les « bullae » contre le mauvais œil

Les Romains avaient pour coutume de faire porter à leurs enfants un bijou destiné à les protéger contre le mauvais œil et les esprits malveillants : la bulla, qui prenait la forme d'un petit pendentif contenant des amulettes magiques. Les garçons libres la portaient dès la naissance et jusqu'à leur passage à l'âge adulte, célébré lors d'une cérémonie (vers 16-17 ans) au cours de laquelle ils l'abandonnaient et la consacraient généralement aux dieux. Les filles, qui l'arboraient aussi parfois, à l'instar de bracelets ornés là encore d'amulettes protectrices, l'ôtaient le jour de leur mariage. Souvent en or chez les familles riches, la *bulla* était fabriquée à partir de cuir et de bronze dans les foyers plus modestes.

Des modes de vie très distincts selon le statut social

Mais le funéraire n'est pas le seul espace où les petits de l'Antiquité ont laissé leur marque. Dans les habitats gallo-romains, des graffitis maladroits et des dessins témoignent, eux aussi, de cette présence juvénile (*lire l'encadré p. 82*), quand il ne s'agit pas d'exercices scolaires retrouvés sur des tablettes de cire ou des papyrus, dont certains sont même annotés à l'encre rouge par le maître — une couleur décidément intemporelle sur les copies ! Enfin, les jouets, longtemps négligés par les archéologues, constituent une mine d'informations. Dès l'Égypte antique, on trouve des toupies, des poupées articulées, des chariots, des billes, des arcs et des flèches ou encore des petites figurines, parfois à tirer avec une ficelle. La tombe de Toutankhamon elle-même a livré une célèbre toupie en bois, probable jouet d'enfance du pharaon, ou encore ce qui ressemble à un petit char roulant. *« Ces objets ont traversé les millénaires et ils n'ont rien d'anecdotique,* affirme Valérie Delattre. *Ils montrent à leur manière la façon dont fonctionnaient les sociétés.* » Dans la Grèce antique, des poupées déposées dans des sanctuaires semblaient préparer symboliquement les jeunes filles à leur futur rôle maternel. *« Les jouets étaient déjà très genrés : dînettes et poupées pour les filles, jeux d'adresse ou balles pour les garçons.* »

Olivier Blin rappelle tout de même que, quelles que soient les époques, les enfants de l'élite et ceux du peuple ne bénéficiaient pas de la même douceur de vivre. Dans les mines de sel de Hallstatt (Autriche), dès l'âge du bronze, de petits outils adaptés à des mains d'enfants attestent par exemple leur implication précoce dans l'extraction. En Égypte, il existe des enfants esclaves employés à diverses tâches, quand dans l'Empire romain, les familles aisées n'hésitent pas à mettre à leur service les plus petits, parfois nés libres mais vendus par leur propre famille faute de moyens.

VALERIEDELATTRE

« De nombreuses sépultures d'enfants du paléolithique montrent le soin apporté à ces petits êtres lorsqu'ils mourraient »

Valérie Delattre, archéo-anthropologue à l'Institut de recherches archéologiques préventives (Inrap)

TRACES

Saisissants instantanés d'enfance

Certaines découvertes archéologiques nous rapprochent plus que d'autres des petits êtres humains qui ont écrit notre histoire. Parmi elles, les dessins du jeune Omfin, qui vécut au XIIIe siècle à Novgorod, en Russie. Réalisés entre l'âge de 7 et 10 ans, quelques-uns de ses devoirs, de ses notes et dessins gravés au stylet sur 17 fragments d'écorce de bouleau ont été conservés dans un contexte très humide et retrouvés dans les années 1960. Omfin, qui signe parfois ses œuvres, y représente d'amusantes batailles et des cavaliers victorieux aux universels bras « bâtons » levés au ciel, eux-mêmes munis d'adorables mains « en râteau ».

Un autre de ces témoignages particulièrement vivants est le moulage du petit visage joufflu d'un nouveau-né anonyme qui a traversé le temps dans le cimetière gallo-romain parisien de Port-Royal. Celui-ci se trouvait dans un sarcophage en pierre, fouillé en 1878, qui contenait un tout petit squelette et un biberon en verre. Lorsque les fossoyeurs ont refermé le couvercle en pierre sur la cuve, du mortier a chuté sur le visage endormi du bébé et, en séchant, l'a moulé en négatif.

PARIS MUSÉES / MUSÉE CARNAVALET - HISTOIRE DE PARIS

Moulage du visage d'un nouveau-né trouvé dans une tombe gallo-romaine à Paris.

Il semble qu'au Moyen Âge, les clichés se renforcent encore plus. *« On a longtemps décrit cette époque comme réellement indifférente à l'enfance »*, affirme Olivier Blin. Mais une fois de plus, les textes et traces matérielles nuancent cette vision. Comme dans l'Antiquité, des espaces sont réservés aux bébés ou aux enfants dans les cimetières médiévaux. *« On retrouve souvent des sépultures de très jeunes enfants le long des murs d'église, sous les gouttières,* détaille Valérie Delattre. *L'eau de pluie, perçue comme purificatrice, leur assurait symboliquement un "baptême éternel".* » De même, les enfants morts avant « l'âge de raison » — autour de 6 ou 7 ans — sont parfois placés directement dans les églises, près du chœur, et donc au plus proche du Christ, parce que considérés comme des âmes pures. La question du baptême illustre peut-être plus qu'une autre l'intensité de l'investissement parental. Dès l'époque carolingienne, des familles transportent en toute hâte leurs nourrissons morts vers ce que l'on appelle des « sanctuaires à répit », parfois situés à de nombreux kilomètres. *« Avant le XIIe siècle, les limbes, lieu de l'au-delà qui accueille les petites âmes sans baptême dans l'ancienne doctrine catholique, n'existent pas »*, rappelle Valérie Delattre. Aussi les tout-petits qui trépassaient sans avoir eu le temps de recevoir le sacrement du baptême finissaient théoriquement en enfer. *« C'est pourquoi les couples et familles qui perdaient un nouveau-né se précipitaient dans des églises dédiées à la Vierge Marie, dont on se transmettait l'emplacement sous le manteau. Une fois sur place, ils déposaient le petit corps sur l'autel et guettaient un infime mouvement, résultat des premières affres de la décomposition, qui était interprété comme une fugace résurrection permise par Dieu pour autoriser le baptême.* » Face à ces pratiques répandues dans toute l'Europe médiévale, le Vatican finira par formaliser la notion de « limbes ». *« On est donc loin de la résignation supposée »*, conclut Valérie Delattre. Notons que c'est aussi à partir de la fin du Moyen Âge que se développent les premières productions de jouets en série, preuve là encore que le loisir des plus jeunes, et donc leur bien-être, est une préoccupation.

Le XIXe siècle et l'exploitation massive des enfants

Paradoxalement, il faudra attendre le XIXe siècle pour voir l'enfant « perdre de sa valeur sociale ». L'industrialisation, qui consiste en un bouleversement aussi brutal pour les territoires que pour les sociétés qui l'occupent, entraîne une exploitation massive des plus jeunes dans les mines et dans les manufactures. *« On retrouve même des plus petits dans les bagnes »*, rappelle Olivier Blin. *Germinal* d'Émile Zola, *Olivier Twist* et *David Copperfield* de Charles Dickens, ou encore le poème *Melancholia* de Victor Hugo sont autant d'œuvres littéraires qui dénoncent cette triste réalité. *« Même si le travail des enfants a toujours existé, il prend un nouveau visage au siècle de la révolution industrielle : il est plus systématique, plus massif. »* Ironie de l'histoire : alors que les ossements et autres restes de notre passé lointain traduisent finalement une forme de patience, de résilience et, à bien des égards, de tendresse avec les plus fragiles, nos propres livres d'histoire nous rappellent que ce sont bien nos sociétés modernes qui ont posé les jalons d'une nouvelle violence envers les plus petits, et finalement ceux que l'on entendra toujours le moins. ■

Duel fatal à l'âge glaciaire

Des analyses médico-légales poussées ont permis de reconstituer un épisode sanglant de la préhistoire européenne : un jeune « prince » a fait face à un ursidé, il y a plus de 27 000 ans.

Superbe et mutilé, il gisait là, coiffé de perles sur un lit d'ocre rouge, une grande arme de silex placée dans sa main droite, mais gueule et corps cassés : mandibule délogée et clavicule gauches manquantes, thorax fracturé, pied labouré, orteil émietté. Un « cold case » irrésolu de la préhistoire italienne. Chute ? Passage à tabac ? Attaque animale ? Daté de -27 900 ans à -27 300 ans, ce cas a été récemment résolu dans le *Journal of Anthropological Sciences*. *« Les raisons de la mort violente d'"Il Principe" (le prince), un adolescent enterré avec les honneurs à l'époque gravettienne, intriguaient les scientifiques depuis 1942, date de l'ouverture de sa tombe richement ornée de pendentifs d'ivoire, de bâtonnets en corne travaillée, dans la grotte des Arene Candide dans la Ligurie italienne »*, raconte Vitale Sparacello, bioarchéologue à l'université de Cagliari, en Sardaigne (Italie), qui a obtenu l'autorisation de réexaminer les ossements un par un.

Les découvreurs avaient rapidement suspecté une attaque animale, mais ne l'avaient ni prouvée ni publiée, et les ossements avaient été acheminés vers le musée d'Archéologie de Ligure, à Gênes. Aujourd'hui, des photographies haute résolution, des modèles 3D et des observations microscopiques ont permis de revisiter chaque fracture et chaque marque laissée sur le corps de l'adolescent. Peut-être était-il parti à la chasse. *« Le plus vraisemblable est qu'il ait rencontré un ours brun ou un ours des cavernes, une espèce éteinte il y a 30 000 ans. Herbivore, mais du genre à se défendre »*, précise Vitale Sparacello.

Une longue agonie après les blessures infligées par l'ours

On ignore comment le jeune homme était armé, sans doute de lames fines de silex, le harpon n'ayant été inventé que plus tardivement. Il est difficile de retracer pas à pas le combat qui a opposé l'adolescent et l'ursidé, mais au final, le premier a eu les chevilles et le crâne labourés par des griffes. Non content d'avoir la mâchoire et l'épaule arrachées, il a diverses fractures au crâne, aux pieds, aux dents et au cou, sans oublier un péroné perforé. Un schéma traumatique semblable aux blessures des accidents de la route modernes, expliquent les scientifiques qui ont fait son autopsie plus de 27 000 ans après sa mort. *« Il était probablement un jeune chasseur en herbe, encore en plein apprentissage, lorsque l'incident s'est produit »*, estime Vitale Sparacello. Malgré le traumatisme thoraco-facial et les blessures défigurantes, l'analyse microscopique des os et de leurs lésions suggère qu'Il Principe a survécu quelques jours, soigné. L'événement violent et la longue agonie se sont peut-être reflétés dans l'enterrement élaboré, suivant l'usage présumé des gravettiens d'enterrer formellement les individus morts de façon exceptionnelle. ■

Rachel Fléaux

LORENZO DONZELLI, WIKICOMMONS, DOMAINE PUBLIQUE

Mis au jour dans la grotte des Arene Candide (nord-ouest de l'Italie), l'adolescent était enterré somptueusement (avec notamment une coiffe de perles ici reconstituée).

Un spinosaure à la crête impressionnante

Découvert au Niger, « Spinosaurus mirabilis » vivait il y a environ 95 millions d'années. Il portait sur le crâne la plus haute crête connue chez un dinosaure prédateur, dont la fonction demeure encore inconnue.

Voilà plus d'un siècle que les paléontologues attendaient ce moment ! Déterrer un fossile de *Spinosaurus*, un dinosaure théropode carnivore. Les premiers spinosaures avaient été découverts en Égypte, en 1912, par le paléontologue allemand Ernst Freiherr Stromer von Reichenbach. Les restes correspondaient à une espèce baptisée *Spinosaurus ægyptiacus* et comprenaient une mandibule, quelques dents et plusieurs vertèbres. Mais, conservés en Allemagne, ils ont été complètement détruits durant les bombardements de la Seconde Guerre mondiale. De nouveaux spécimens de spinosauridés ont été mis au jour presque trente ans plus tard, à partir des années 1970, dans toute l'Afrique du Nord. Aujourd'hui, des fossiles de cette famille de dinosaures ont été déterrés sur tous les continents, mais aucun squelette comparable à *Spinosaurus ægyptiacus* n'avait été retrouvé depuis un siècle.

Présenté dans une étude dirigée par Paul Sereno, de l'université de Chicago (États-Unis) et publiée dans la revue *Science*, *Spinosaurus mirabilis* est la première espèce appartenant au même genre. Les spécimens, provenant de la formation de Farak, située dans un bassin continental du Niger, datent d'environ -100 à -95 millions d'années (au cénomanien). Tous sont immatures et les individus décrits mesurent environ 8 à 9 mètres de long pour une masse de 2,5 à 3 tonnes. Des analyses histologiques sur les os des membres et les côtes doivent encore préciser leur stade de croissance. Selon les projections, ces dinosaures auraient pu atteindre à l'âge adulte une longueur dépassant 12 mètres et une masse approchant 7 à 8 tonnes.

Comme tous les spinosauridés, *S. mirabilis* possède un museau allongé, une voile dorsale, des dents coniques non denticulées et des narines fortement reculées. Mais il s'en distingue par une spectaculaire crête préfrontale en forme de cimeterre, arquée vers l'arrière au-dessus des orbites. Cette structure, qui atteint 27 cm de hauteur osseuse chez les plus grands spécimens trouvés — et aurait pu mesurer jusqu'environ 40 cm chez les adultes — intrigue par sa finesse.

Les fossiles ont été mis au jour dans des sédiments fluviaux

« La crête en forme de cimeterre est une structure relativement fine, certains spécimens ne dépassant pas 2 cm d'épaisseur. Elle est même plus mince que certaines épines neurales de la célèbre voile dorsale, précise Daniel Vidal, paléontologue des vertébrés dans les universités de Madrid (Espagne) et de Chicago (États-Unis), coauteur de l'étude. *Cette relative fragilité nous conduit à exclure un rôle d'arme.* » L'hypothèse de la thermorégulation est également jugée peu probable.

DANIEL VIDAL

« La relative fragilité de la structure de la crête nous conduit à exclure un rôle d'arme »

Daniel Vidal, paléontologue à l'université de Chicago (États-Unis) et l'université de Madrid (Espagne)

DANI NAVARRO

Outre une crête en forme de cimeterre, « Spinosaurus mirabilis » avait des dents coniques imbriquées lui permettant de maintenir et transpercer sa proie (vue d'artiste).

« La majorité de la surface n'aurait pas eu une densité vasculaire suffisante pour dissiper beaucoup de chaleur », explique le paléontologue. Et, ajoute-t-il, même spectaculaire à l'échelle du crâne, la crête reste modeste comparée au volume total d'un animal de plusieurs tonnes. Les chercheurs privilégient donc une fonction d'affichage visuel. Sur les trois crêtes découvertes, deux sont fines et élancées, la troisième nettement plus robuste. *« Avec un échantillon aussi réduit, il est impossible de trancher. Il n'est pas impensable que ces deux morphologies extrêmes reflètent un dimorphisme sexuel »*, admet Daniel Vidal.

Mais la découverte de ces spécimens est encore plus intrigante pour un autre aspect : contrairement aux fossiles classiques de spinosaures, souvent issus de dépôts côtiers proches de l'ancien océan de la Téthys, ils ont été mis au jour dans des sédiments fluviaux, entre 500 et 1000 kilomètres des marges marines de l'époque. *« Tous les vertébrés de plus d'une tonne ayant adopté un mode de vie pleinement aquatique sont marins »*, rappelle Daniel Vidal. Trouver un spinosauriné dans un environnement strictement fluvial change la perspective. D'autant que, dans les régions anatomiques comparables, *S. mirabilis* et *S. ægyptiacus* sont presque indiscernables.

Les deux espèces partagent ainsi un véritable « piège à poissons » : des dents coniques sans dentelures qui s'emboîtent partiellement, empêchant une proie glissante de s'échapper après la morsure. Leurs narines externes, très reculées, permettaient d'immerger le museau en eau relativement profonde (jusqu'à environ deux mètres chez les plus grands individus) tout en continuant à respirer. L'extrémité du museau présente un réseau neurovasculaire dense, probablement sensible aux mouvements des proies. Enfin, les insertions osseuses indiquent des muscles puissants pour la flexion rapide vers le bas de la tête et du cou, utiles pour frapper un poisson en surface.

Un pêcheur capable d'avancer dans des eaux peu profondes

En 2022, la même équipe avait déjà mis en doute les capacités de plongée de *S. ægyptiacus*. La flottabilité posait problème : *« Pour se redresser,* Spinosaurus *n'aurait pas pu générer suffisamment de force avec ses membres pour contrer la poussée de l'eau sur la voile »*, résume Daniel Vidal. Pour l'instant, aucune adaptation nette à la plongée active ne se dégage de ces nouveaux spécimens. Les données anatomiques pointent vers un pêcheur de surface, capable d'avancer dans des eaux peu profondes et d'y harponner ses proies.

L'étude propose aussi un modèle évolutif en trois phases pour les spinosauridés. Au jurassique, apparaît le museau allongé spécialisé dans la capture des poissons. Au crétacé inférieur, les premiers spinosaures se diversifient largement autour de la Téthys, de l'Europe à l'Afrique et au Brésil. Vers 100-95 millions d'années, au temps de *Spinosaurus*, ils atteignent leur taille maximale, mais deviennent extrêmement spécialisés dans la piscivorie. Leur aire de répartition se restreint à l'Afrique du Nord et au nord du Brésil.

« Aire géographique réduite, faible nombre d'espèces, spécialisation extrême et structures d'affichage coûteuses ont probablement joué contre eux dans un monde en rapide transformation », analyse Daniel Vidal. À la fin du cénomanien, la montée rapide du niveau marin fragmente les continents, submerge certaines régions et s'accompagne d'un réchauffement global marqué. Dans ce contexte instable, ces grands piscivores spécialisés disparaissent. ■ **Joël Ignasse**

Expédition Lapérouse, une moisson de découvertes

Le destin tragique de l'expédition Lapérouse, disparue en 1788 dans le Pacifique Sud, a éclipsé l'importance véritable de ce voyage d'exploration. Grâce au journal de bord, aux lettres et aux rapports envoyés en France à chaque étape de ce périple, il est possible de dresser un inventaire des connaissances acquises durant près de trois ans de navigation.

Par Bernard Jimenez

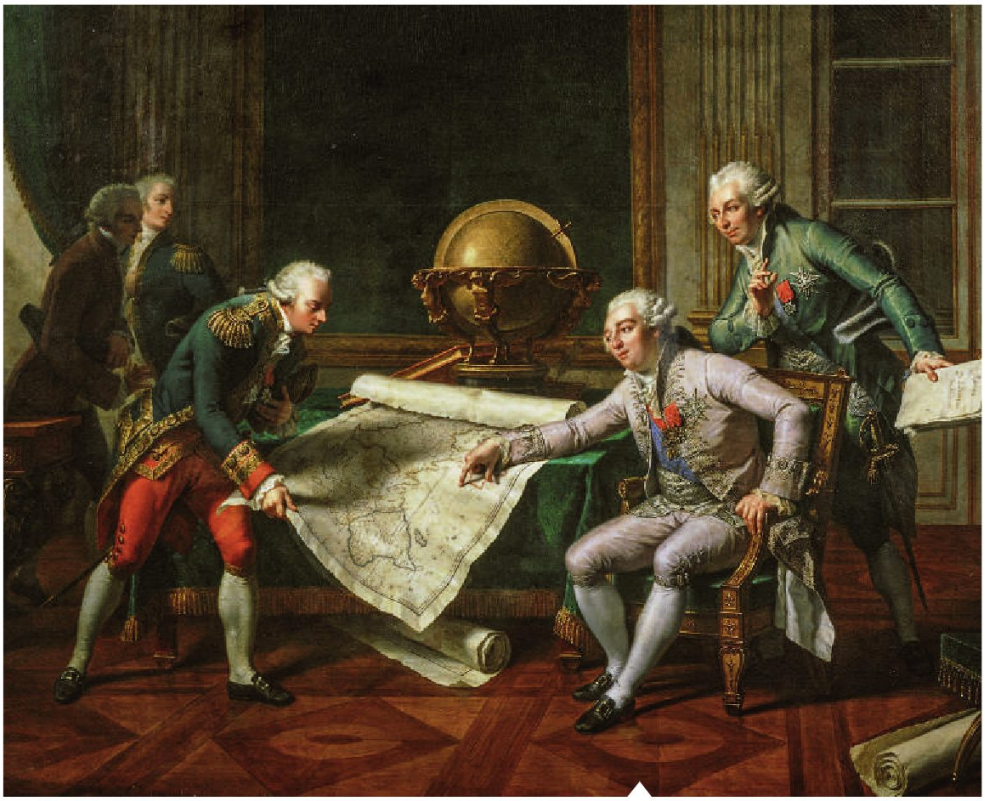
En 1783, le traité de Paris met un terme à la guerre d'indépendance des États-Unis d'Amérique, permettant à la France de retrouver la paix. Le roi Louis XVI voit là une opportunité de rivaliser avec la domination anglaise sur les mers, en ouvrant de nouvelles routes commerciales et en contrant l'expansion maritime et coloniale des Anglais en Océanie, des Russes en Alaska et des Espagnols en Haute-Californie. Un premier projet de voyage à vocation commerciale est soumis au roi, mais il évolue rapidement vers une expédition de découvertes, en phase avec l'esprit des Lumières, qui prône l'ouverture au monde et à la science. Cette expédition sera composée de deux navires, *La Boussole* et *L'Astrolabe*, sous le commandement de Jean-François de Galaup, comte de Lapérouse, reconnu à Versailles pour ses compétences maritimes et son humanisme. Chaque navire embarquera environ 110 membres d'équipage, principalement des militaires, accompagnés de scientifiques issus de diverses disciplines. Partis de Brest le 1er août 1785, les navires atteindront l'océan Pacifique en février 1786 pour une vaste exploration qui se conclura tragiquement par un naufrage, en mai ou juin 1788, sur l'île de Vanikoro, dans l'archipel des Salomon. Pendant plus de deux siècles, le destin tragique de l'expédition Lapérouse a éclipsé l'importance véritable de ce voyage d'exploration. Heureusement, grâce au journal de bord, aux lettres et aux rapports envoyés en France chaque fois que cela était possible, nous avons aujourd'hui la possibilité de revivre le déroulement de cette aventure et d'exploiter les nombreuses données recueillies tout au long du voyage. En les associant aux vestiges extraits des épaves (objets ethnologiques, minéraux, coquillages, graines…), on peut dresser un inventaire des connaissances acquises durant près de trois ans de navigation.

B. JIMENEZ

Historien, voyageur et photographe, Bernard Jimenez a notamment publié « L'expédition Lapérouse, une aventure humaine et scientifique autour du monde » (Glénat, 2022).

Une connaissance affinée de la cartographie mondiale

Les officiers de marine ont une formation scientifique, notamment en hydrographie et en astronomie, mais le roi veut aussi faire progresser la géographie, la botanique, la zoologie et l'anthropologie. Pour cela, les navires embarquent dix savants et artistes, un jardinier, un horloger et



AKG-IMAGES / ERICH LESSING

« Louis XVI donnant ses instructions à Lapérouse », peinture de Nicolas Monsiau (1817). Le roi charge l'officier de marine en 1785 de mener une expédition autour du monde.

La curiosité des savants était encyclopédique et ils ont collecté et classé des dizaines d'espèces dont on ignorait jusqu'alors l'existence

un interprète de russe. Jamais, avant cette expédition, on n'avait emmené une équipe scientifique aussi importante ; mais ils devront étudier, en un voyage, autant de mers et de côtes que l'explorateur britannique James Cook en trois tours du monde !

Les marins et les astronomes avaient pour mission d'affiner la cartographie du monde et l'objectif a été atteint. Ils ont découvert des îles inconnues (l'île Necker à Hawaii, l'île Moneron à l'ouest de Sakhaline, Sava'i, Manono et Apolima aux Samoa), rayé de la carte des îles fantômes (l'île Grande de La Roche dans l'Atlantique Sud ou Rica de Oro et Rica de Plata à l'est du Japon) et repéré des parages dangereux (basse des Frégates françaises, dans l'archipel hawaïen). Ils ont levé les plans des côtes, dessiné leur profil vu du large, nommés caps et baies et sondé les fonds pour en connaître la profondeur et la nature. Grâce au travail des officiers et des astronomes qui ont combiné deux façons de calculer la longitude (par la méthode des « distances lunaires » et à l'aide des chronomètres de marine), les deux cartographes de l'expédition, l'ingénieur Sébastien Bernizet et l'officier François Michel Blondela, ont pu établir de nouvelles cartes plus précises. Bien que gêné, comme l'avait été James Cook, par des pluies et des brumes continuelles, Lapérouse est le premier à évoquer l'hypothèse — qui se révélera exacte — d'un dédale d'îles le long de la côte nord-ouest de l'Amérique. Toutefois, les plus grandes découvertes géographiques se situent en mer de Chine et dans la manche de Tartarie (entre la Sibérie orientale et l'île de Sakhaline), dont la plupart des côtes étaient inconnues des Européens. Il croit — avec raison — à l'insularité de Sakhaline (beaucoup plus longue au sud qu'on ne le croyait) et est le premier Européen à franchir le détroit qui porte aujourd'hui son nom, entre la pointe sud de Sakhaline et l'île de Hokkaido au Japon.

Répondant aux demandes de la Société de médecine, le chirurgien Claude Nicolas Rollin décrit l'aspect physique des indigènes (à l'île de Pâques, à Hawaii, à La Concepción et en Californie). Il les mesure, les interroge pour connaître leurs maladies et s'intéresse à leurs mœurs et à leurs coutumes. En Alaska, chez les Tlingits, au sud de Sakhaline chez les Aïnous, l'expédition réalise

les toutes premières enquêtes anthropologiques menées sur ces populations, avec transcription des langues indigènes. Dans son récit, Lapérouse essaie d'apporter un témoignage honnête sur le comportement des peuples rencontrés, évitant tout jugement selon la morale européenne. Ces observations sont complétées par la collecte — par l'échange — d'objets indigènes (outils, ornements traditionnels…). S'il en reste peu aujourd'hui, les dessins de Gaspard Duché de Vancy qui nous sont parvenus restent un inestimable témoignage de ces premières rencontres entre des Européens et les peuples du Pacifique.

La curiosité des savants était encyclopédique et ils ont collecté et classé des dizaines d'espèces dont on ignorait jusqu'alors l'existence. L'activité la mieux connue est la botanique, car Jean Nicolas Collignon et Joseph Hughes Boissieu de La Martinière ont régulièrement envoyé à André Thouin, jardinier en chef au Jardin royal des plantes médicinales, des courriers qui ont heureusement été conservés, ainsi que des collections de graines. L'une d'elles, la verveine des sables, *Abronia umbellata Lam.*, récoltée en Californie et envoyée à André Thouin, a fleuri au Jardin des Plantes en 1789 et figure aujourd'hui dans l'herbier de Jussieu au Muséum national d'histoire naturelle. Comme les autres collections d'histoire naturelle, les herbiers de l'expédition ont disparu dans le naufrage mais il nous reste la description des plantes utiles et la manière de les préparer (farine, teinture, filasse, savon…). Quelques dessins d'histoire naturelle nous sont parvenus : une liane du Chili et trois oiseaux en Alaska et en Californie. Quand on voit la qualité et la précision de ces dessins, on mesure l'ampleur de la richesse qui a été perdue.

GILLES MERMET / LA COLLECTION

Graphomètre mis au jour en 1999 sur le site de l'épave de « L'Astrolabe », au large de l'île de Vanikoro.

De l'observation des fonds marins à la découverte du géomagnétisme

En Alaska, des fossiles de coquilles Saint-Jacques (plutôt présentes dans les eaux chaudes ou tempérées), trouvés à plus de 800 mètres au-dessus du niveau de la mer, ont intrigué les savants qui se sont avoués incapables d'expliquer cette présence, à cette hauteur, sous cette latitude. Ce n'est qu'au XIXe siècle, avec les travaux de Jean-Baptiste de Lamarck, de Charles Darwin et, plus tard, de la théorie de la tectonique des plaques, que l'on expliquera la formation et la localisation de ces fossiles.

De leur côté, les physiciens ont inlassablement réalisé des observations, des analyses et des mesures scientifiques *in situ* (au niveau de la mer, au sommet des volcans, lors du passage de l'équateur) sur l'eau de mer, les sols, l'air, l'aimant, l'électricité… Robert de Lamanon, sans doute le plus « savant » d'entre eux, a même effectué les premières études de l'intensité relative du champ magnétique terrestre. Sensible aux équilibres du monde rural, Lapérouse a également constaté les effets néfastes que l'humain peut avoir sur son environnement (île de Pâques), mais aussi sa remarquable faculté d'adaptation : protection des plantations par des murets, épandage d'herbe ou de pierres pour conserver l'humidité… Il a aussi, avec beaucoup de clairvoyance, évalué le potentiel de développement des régions visitées et perçu notamment l'importance à venir de la Californie.

Fidèle aux instructions du roi, toujours avec bienveillance et sans jamais chercher à conquérir de nouvelles terres, Lapérouse a repoussé les frontières du monde connu et rendu les routes du Pacifique plus sûres. Et finalement, malgré une coexistence parfois difficile entre marins et savants, la plus grande mission d'exploration française du XVIIIe siècle a fait progresser les connaissances dans bon nombre de disciplines. ■

ÉQUIPEMENTS

À la pointe des savoirs

La plupart des savants de l'expédition Lapérouse emportent leurs instruments scientifiques personnels mais, s'ils en font la demande, rien ne leur est refusé et on achète aux constructeurs les plus réputés tout ce qui est à la pointe du progrès : sextants, octants, quarts de cercle français ou anglais et cinq chronomètres de marine construits par Ferdinand Berthoud, horloger-mécanicien du roi. L'Académie des sciences et l'Observatoire royal prêtent aussi des instruments. Le Dépôt des cartes et plans de la Marine tout comme l'Académie de marine sont également mis à contribution. Et on dépense encore 3000 livres pour compléter la bibliothèque de bord avec des ouvrages scientifiques et techniques, des comptes rendus d'expéditions scientifiques et des récits de voyage, dont plusieurs relatant les voyages de James Cook, référence essentielle pour le comte de Lapérouse. Le jardinier André Thouin demande qu'on achète pour le botaniste Jean Nicolas Collignon le *Species Plantarum* et le *Genera Plantarum* de Carl Von Linné, tandis que l'abbé Jean-André Mongez prend la collection complète du *Journal de physique*. Mais c'est le physicien Robert de Lamanon qui constitue la bibliothèque la plus importante et la plus éclectique : elle va de l'*Ordre naturel des oursins* du naturaliste prussien Jacob Theodor Klein à *Robinson Crusoe* de Daniel Defoe !

Chez votre marchand de journaux

RENDEZ-VOUS

SOMMAIRE

▶ C'est à lire
p. 90

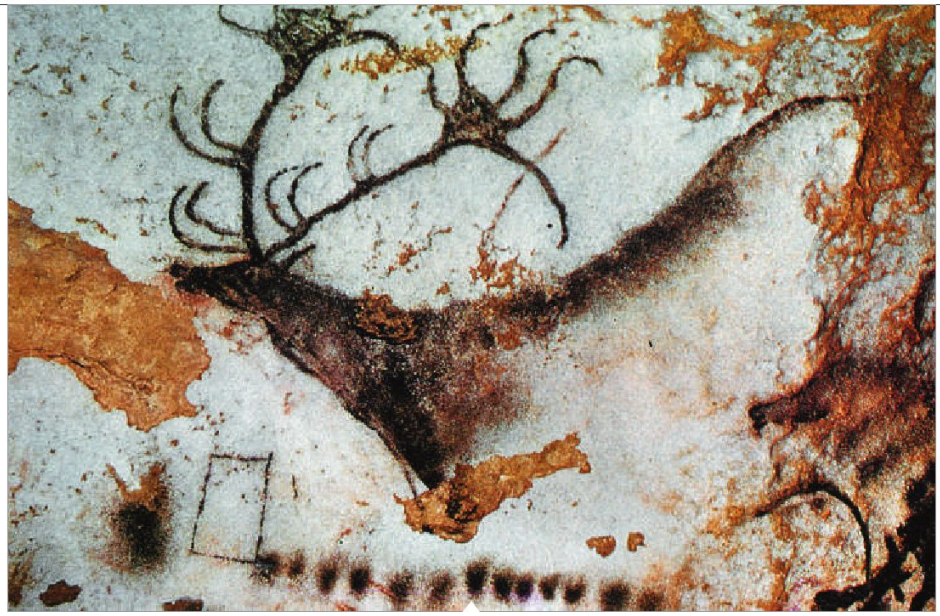
▶ C'est à voir
p. 92

▶ Questions de lecteurs
p. 94

▶ Courrier
p. 95

▶ Le ciel du mois
p. 96

▶ À retrouver sur notre site
p. 98



BERNARD MARIE / AKG IMAGES

Le rectangle, tracé sous la peinture d'un cerf ornant l'une des parois de la grotte de Lascaux (paléolithique supérieur), témoigne de la capacité d'abstraction d'« H. sapiens ».

Aux origines cérébrales de la géométrie

Le neuroscientifique Stanislas Dehaene explique comment la géométrie est inscrite de longue date dans le cerveau d'« Homo sapiens ».

CONCEPTS Dans l'ombre des parois de Lascaux, un détail minuscule retient l'attention de Stanislas Dehaene : quatre lignes noires refermées en un rectangle. Ni bison ni cheval, mais une figure abstraite tracée il y a vingt millénaires. C'est à partir de cette forme que le neuroscientifique construit son enquête : et si la géométrie n'était pas née en Grèce, mais inscrite de longue date dans le cerveau d'*Homo sapiens* ? Le livre, dense et solidement charpenté, prolonge les cours que Stanislas Dehaene consacre au Collège de France aux bases neuronales des mathématiques. Vestiges préhistoriques et imagerie cérébrale s'y répondent : aux gravures de Blombos en Afrique du Sud répondent les cartes d'activation du cortex pariéto-frontal ; aux bifaces acheuléens façonnés avec une symétrie obstinée depuis plus d'un million d'années, répondent les expériences menées chez l'enfant, le mathématicien expert ou le primate. Si le « sens du nombre » est ancien et largement partagé chez les animaux, l'humain franchit, lui, un seuil décisif en combinant des représentations selon des règles internes. C'est la « compositionnalité » : soit la faculté d'assembler des éléments simples pour engendrer une infinité de concepts. Un carré n'est pas seulement perçu ; il est reconstruit comme réseau de relations. La portée de cette enquête scientifique rigoureuse est vertigineuse : les mathématiques émergeraient de l'évolution d'un cerveau capable de manipuler des symboles hiérarchisés. Le rectangle de Lascaux devient alors le signe discret d'une révolution cognitive ancienne — peut-être l'un des indices les plus ténus, mais aussi les plus troublants, de ce qui fait la singularité de notre espèce. ■ **Hugo Jalinière**

Le Rectangle de Lascaux, Stanislas Dehaene, Odile Jacob, 352 p., 24,90 €

Dépression adolescente

TÉMOIGNAGE Elle a 15 ans et déjà le sentiment que la vie pèse trop lourd. Dans ce roman graphique, l'illustrateur

Mathieu Persan raconte la dépression de sa fille, d'abord confondue avec les tourments ordinaires de l'adolescence. Puis surviennent la tentative de suicide, l'hospitalisation, l'effroi d'un père dont les certitudes vacillent face à un monde qu'il comprend mal. Ce récit à deux voix, d'une grande sincérité, met à nu la fragilité psychique des adolescents. Un témoignage qui brise le silence sur un sujet encore tabou. ■ **L. L.**

Le Passage, Mathieu Persan, Hachette, 256 p., 19,95 €

Image numérique

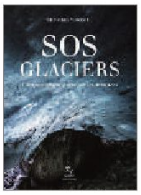
ALERTE Connaissez-vous l'anthropotechnie ? C'est la façon dont notre sensibilité est modifiée par les technologies. L'auteure, neuroscientifique et psychologue, alerte : *« Nous n'avons pas su anticiper l'effet*

de l'hyper-connexion et des réseaux sociaux sur notre vie affective et psychique. Nous reproduisons le même aveuglement avec les IA génératives. » Et souligne ce triste paradoxe : certains font appel à la chirurgie esthétique pour optimiser leur image numérique… alors que *« l'objectif du smartphone augmente la largeur du nez de 30 % pour un selfie »* ! ■ **M. N.**

Notre cerveau sous influence, Nadia Guerouaou, Eyrolles, 272 p., 19,90 €

Glaciers en péril

EXPERTISE Longtemps délaissés par les scientifiques, les glaciers sont un sujet de préoccupation à l'heure du changement climatique. Le



glaciologue Christian Vincent en prend conscience dès 2008, lorsqu'il doit analyser les risques du glacier de Tête-Rousse (Haute-Savoie), qui avait causé 175 décès en 1892. Dans ce livre très personnel, il revient sur son parcours d'expert, notamment après la destruction des villages de La Bérarde en 2024, en Isère, et de Blatten, en Suisse en 2025. Il nous emmène ensuite sur d'autres glaciers du monde, tout aussi inquiétants. ■ **S. R.**

SOS glaciers, Christian Vincent, Guérin/Éd. Paulsen, 272 p., 25 €

Mieux recycler nos excréments

RESSOURCE Pourquoi s'intéresser à notre urine et à nos matières fécales ? Mais *« parce que nous sommes dans la m…! »* Celui qui l'affirme sans détour est ingénieur des Ponts et Chaussées et fondateur, en 2014, du programme de recherche Ocapi (pour Organisation des cycles carbone, azote et phosphore dans les territoires). Le point de départ de son analyse : il est aberrant de diluer dans des litres et des litres d'eau les précieux engrais naturels qu'ils contiennent, en induisant en outre la pollution des milieux aquatiques. Ce système, dont le livre détaille les fondements chimiques et retrace les étapes historiques, a culminé avec la fabrication des engrais de synthèse, reléguant dans l'oubli le cycle d'interdépendances qui lie les humains, par leurs excrétats azotés, à la terre, aux plantes, à l'air. Une lecture sérieuse qui se conclut par un véritable mode d'emploi du « faire pipi » vertueux. ■ **Andreina De Bei**

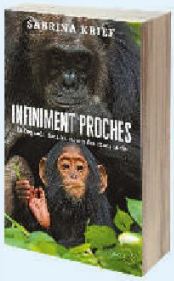
Une autre histoire des excréments, Fabien Esculier, Actes Sud, 304 p., 21 €

Technofolies

IDENTITÉS Imaginez un monde où des tests ADN seraient accessibles au grand public pour retrouver ses origines et où des IA sauraient adresser des messages personnalisés. C'est parce que ce monde est étrangement semblable au nôtre que *L'ADN du chaos* donne à réfléchir :

plus qu'un roman haletant, l'ancienne collaboratrice de *Sciences et Avenir* Elena Sender nous livre une exploration inquiétante de ce à quoi ces technologies pourraient vite conduire dans une période de montée des revendications identitaires. ■ **M. N.**

L'ADN du chaos, Elena Sender, Albin Michel, 384 p., 21,90 €



Portraits de chimpanzés

RÉCIT Vétérinaire et professeure au Muséum national d'histoire naturelle, Sabrina Krief revient sur plus de 25 ans de terrain en Ouganda, auprès d'un groupe de chimpanzés de la forêt de Kibale. Après de longues années à seulement sentir leur odeur sans jamais les voir, elle et son équipe ont réussi à leur faire accepter leur présence et à étudier au quotidien leurs interactions sociales, leurs communications, leurs jeux, leurs pratiques éducatives et médicinales, leur humour… Au fil des chapitres, elle brosse ainsi le portrait sensible et attachant de 12 d'entre eux, d'Elliott, le mâle alpha mystérieux et charismatique, au jeune Gabin, qui *« passe le plus clair de son temps à jouer »*, en passant par Gina, jeune mère angoissée à la recherche de conseils auprès des autres mères ou encore Koji, adolescente ayant quitté le groupe pour s'intégrer à une autre communauté de chimpanzés. Des individualités émouvantes, dont l'avenir est aujourd'hui menacé par l'appétit d'espaces des humains. ■ **Sylvie Rouat**

Infiniment proches, Sabrina Krief, Grasset, 240 p., 20 €

▶ **Ce symbole désigne les nouvelles expositions**

EXPOSITIONS

Alise-Sainte-Reine (21)

César, tous les chemins mènent à Rome, saison II
Cette exposition sur les multiples facettes du général romain (militaire, politicien, réformateur) est reconduite. Le parcours fait la part belle aux peintures, gravures et monnaies.
MuséoParc Alésia, 1, route des Trois-Ormeaux. Rens. : 03.80.96.96.23.

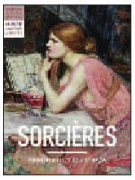
Elbeuf-sur-Seine (76)

▶ **Des dinosaures aux oiseaux**
Un parcours retraçant 150 millions d'années d'évolution, des petits dinosaures à plumes aux oiseaux actuels. Sans oublier la disparition de certaines espèces, tel le dodo ou l'*Æpyornis*.
Fabrique des Savoirs, 7, cours Gambetta, jusqu'au 21 mars 2027. Rens. : 02.32.96.30.40.

Le Pont-de-Claix (38)

▶ **La grotte Chauvet, hors du temps**
Croisant spectacle contemplatif et données scientifiques, ce film est une immersion dans ce joyau archéologique qu'est la grotte. Le billet donne accès à l'exposition consacrée au site.
Cosmocité, 85, cours Saint-André, jusqu'au 3 mai. Rens. : 04.80.42.34.34.

Nantes (44)



Sorcières
C'est l'histoire de l'une des plus importantes persécutions de l'histoire : celle des femmes accusées de sorcellerie à travers les siècles. Le parcours examine les origines de la figure de la sorcière, entre réalité et fantasmes.
Château des ducs de Bretagne, 4, place Marc-Elder, jusqu'au 28 juin. Rens. : 08.11.46.46.44.

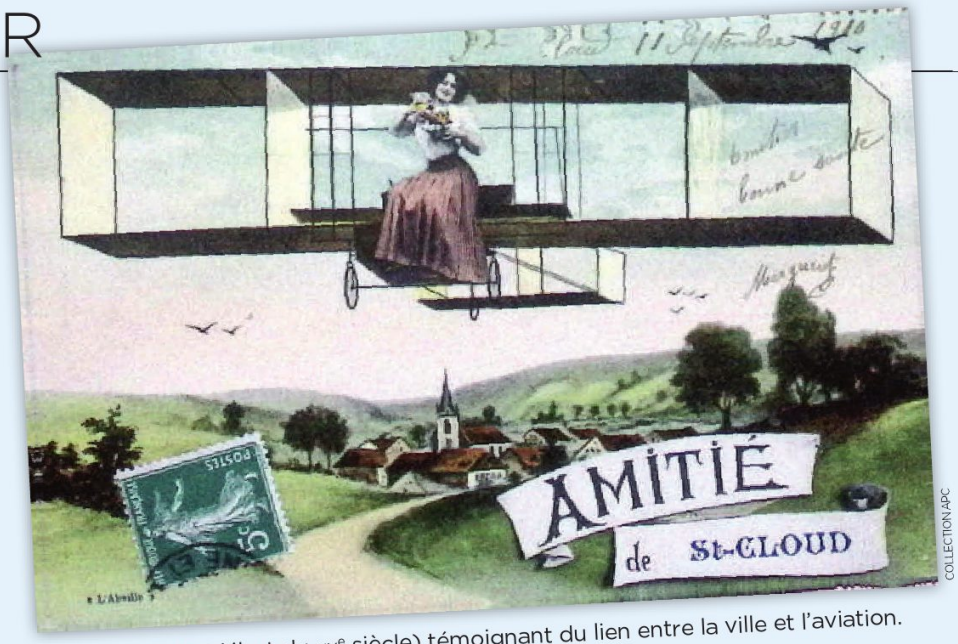
Paris (75)

▶ **Sophie Germain, les nombres à tout prix**
La mathématicienne Sophie Germain (1776-1831), spécialiste de la théorie des nombres, s'est fait une place dans une discipline à l'époque réservée aux hommes. Retour sur son histoire et ses travaux.
Institut Henri-Poincaré, 11, rue Pierre-et-Marie-Curie. À partir du 1er avril. Rens. : 0.44.27.64.73.

▶ **Moi et les autres, regards d'artistes sur nos vies en ligne**
Une trentaine d'artistes français et internationaux explorent l'influence d'Internet et des réseaux sociaux sur nos relations et comportements quotidiens. Dialogue entre créations, installations et commentaires de scientifiques.
Fondation groupe EDF, 6, rue Récamier, jusqu'au 27 septembre. Rens. : 01.40.42.35.35.

▶ **Voyage en milieux humides**
Un parcours de découverte des écosystèmes aquatiques. Les visiteurs peuvent observer des espèces emblématiques, comme le lamantin et le flamant rose, ou plus rares, telle la rainette aux yeux noirs ou la cistude d'Europe.
Parc zoologique de Paris, avenue Daumesnil, jusqu'au 1er novembre. Rens. : 01.44.75.20.00.

▶ **Byblos, cité éternelle**
Appelé aujourd'hui Jbeil (Liban), Byblos a été le premier port maritime mondial, commerçant notamment avec l'Égypte des



COLLECTION APC

Carte postale (début du XXe siècle) témoignant du lien entre la ville et l'aviation.

Saint-Cloud (92) / Exposition

Saint-Cloud dans les nuages, une aventure aéronautique

Berceau des premières montgolfières et des premiers avions, Saint-Cloud figure parmi les lieux fondateurs de l'aéronautique. « *Sa position en promontoire et la présence de mécènes comme Philippe d'Orléans ont fait de cette ville un emplacement privilégié pour la conquête du ciel* », résume Damien Chantrenne, directeur du musée des Avelines. Installée au cœur d'une villa art déco sur les hauteurs de la ville, l'exposition retrace l'histoire des pionniers de l'air, depuis le mythe d'Icare jusqu'aux aéroclubs féminins. Le parcours révèle comment cette révolution technique est devenue un symbole de liberté et d'émancipation. Pièce phare de l'exposition : une réplique de la *Demoiselle* d'Alberto Santos-Dumont, premier avion léger français, trône au milieu d'une rotonde. Le voyage est ponctué d'œuvres d'art, d'archives et de croquis scientifiques, témoins de ce tournant majeur de l'ingénierie. Un récit qui s'écrit encore aujourd'hui sur les coteaux de Saint-Cloud, où prospère l'industrie de l'aviation. ■ **Thaïs de Bastard**

Musée des Avelines, 60, rue Gounod, jusqu'au 5 juillet. Rens. : 01.46.02.67.18.

pharaons. Remontant à près de 9000 ans, son histoire est retracée au travers de 470 œuvres.
Institut du monde arabe, 1, rue des Fossés-Saint-Bernard, jusqu'au 23 août. Rens. : 01.40.51.38.38.

▶ **Le testament de Napoléon Ier**
Ce document de 58 pages rédigé par Napoléon quelques jours avant sa mort en 1821 est conservé dans l'armoire de fer des Archives nationales depuis 1860. Il est présenté exceptionnellement au public.
Archives nationales, 60, rue des Francs-Bourgeois, jusqu'au 29 juin. Rens. : 01.40.27.60. 96.

Saint-Étienne (42)

▶ **Quand la Terre tremble**
Maquettes animées, expériences, animations interactives expliquent ce que ce sont les séismes, mais aussi les méthodes pour les mesurer et les moyens de s'en protéger.
La Rotonde, 158, cours Fauriel, jusqu'au 25 juillet. Rens. : 04.77.42.02.78.

Solutré-Pouilly (71)

▶ **Le propulseur, des chasseurs de rennes aux chasseurs de kangourous**
L'histoire de cette arme de jet, utilisée depuis 20 000 ans pour la chasse et la pêche, est retracée à travers des objets ethnographiques, des moulages et des reconstitutions, de l'Europe préhistorique aux peuples aborigènes d'Australie.
Musée de préhistoire, Chemin de la Roche, jusqu'au 3 janvier 2027. Rens. : 03.85.35.82.81.

Toulouse (31)

▶ **Epsilon**
Cette exposition accompagne la mission spatiale de Sophie Adenot. Elle permet de suivre ces neuf mois dans la Station spatiale internationale et les expériences scientifiques qui seront menées.
Cité de l'espace, avenue Jean-Gonord. Rens. : 05.67.22.23.24.

Villeneuve d'Ascq (59)

▶ **Vaisseau Terre**
Notre planète au prisme des dernières découvertes scientifiques, de l'observation spatiale à l'étude du climat. Quatre espaces thématiques sont consacrés à la Terre vue de l'espace, à la biodiversité, à la présence humaine et aux enjeux futurs.
Forum des sciences, 1, place François-Mitterrand, jusqu'au 30 août. Rens. : 03.59.73.96.00.

Paris (75) / Réalité virtuelle

Le trésor des bâtisseurs

Les visiteurs peuvent entrer dans le tombeau du roi Ankh-haf, demi-frère de Kheops.

Coiffé d'un casque de réalité virtuelle, le visiteur passe 45 minutes au cœur du chantier de la pyramide de Kheops, en Égypte, mais aussi sur des sites d'extraction de matériaux en Libye et dans le Sinaï, sur des bateaux sillonnant le Nil pour apporter les blocs de calcaire sur le plateau de Gizeh. Mais il n'est pas assis sur un fauteuil : il déambule dans ces lieux reconstitués avec minutie. Le contenu scientifique, dense, met un point d'honneur à intégrer les dernières découvertes. Car au-delà de la simulation, l'enjeu est d'en finir avec les divagations ésotériques concernant les pyramides égyptiennes, afin de ne s'appuyer que sur des connaissances documentées.
Lire notre reportage : sciav.fr/950pyramide ■ **Arnaud Devillard**
Espace Eclipso, 45, rue des Pirogues-de-Bercy. Rens. : sciav.fr/950eclipso

EXCURIO

Scannez ce QR code pour retrouver toutes les expositions

Une formidable diversité
11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 941-942 Les 25 grandes découvertes

N° 943 Dossier spécial Alzheimer

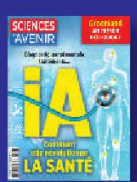
N° 944 Seuls ? À la recherche de la vie ailleurs

N° 945 La science peut-elle sauver le climat ?

N° 946 Les géniales "erreurs" d'Einstein

N° 947 Spécial Aux origines

N° 948 La nouvelle conquête de la Lune



N° 949 IA : comment elle révolutionne la santé

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir - service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 941-942 ❑ N° 943 ❑ N° 944 ❑ N° 945
❑ N° 946 ❑ N° 947 ❑ N° 948 ❑ N° 949

Nom : .....
Adresse : ..... Ville : .....
.....
Code postal : .....

Posez vos questions sur la page **Facebook** de **Sciences et Avenir**

FABRICE COFFRINI/AFP

Glissement de terrain faisant suite à l'effondrement du glacier de Birch, dans les Alpes suisses, le 31 mai 2025.

GÉOLOGIE

Pourquoi les montagnes s'effondrent-elles ?

Konate I.

À première vue, les montagnes semblent immuables. Pourtant, leur histoire est celle d'un équilibre sans cesse menacé, où la gravité finit toujours par l'emporter. Dans les Alpes, l'effondrement des reliefs est d'abord un phénomène naturel et ancien. L'érosion en est le moteur principal. L'eau — sous forme liquide, de neige ou de glace — et le vent attaquent les roches bien plus rapidement que les forces tectoniques ne les soulèvent. Ainsi, alors que la convergence des plaques africaine et européenne continue de faire croître le massif alpin d'environ 1,5 millimètre par an, l'érosion travaille plus vite encore.

Le massif du Mont-Blanc en offre une illustration spectaculaire. Chaque année, près de 100 000 m^3 de roches sont arrachés à ses pentes et entraînés par l'Arve vers le Rhône, ce qui correspond à une perte moyenne d'altitude d'un millimètre par an. Sans cette lente mais constante usure, le toit des Alpes culminerait aujourd'hui à la hauteur de l'Everest ! La gravité, combinée à l'action de l'eau, façonne donc les montagnes autant qu'elle les détruit.

Mais cette mécanique ne suffit plus à expliquer ce qui se joue aujourd'hui. Depuis le début des années 2000, les chercheurs observent une accélération des grands écroulements rocheux. En cause : la dégradation du pergélisol, ce ciment invisible qui, depuis des millénaires, soude les fractures des parois de haute montagne. Présent de manière quasi continue au-dessus de 3300 mètres dans les Alpes, le pergélisol stabilise la roche tant que les températures restent durablement négatives. Or le réchauffement climatique fragilise ce liant. À partir de l'été, la chaleur accumulée par les parois rocheuses pénètre en profondeur, provoquant la fonte progressive de la glace interstitielle. Lorsque ce ciment disparaît, les équilibres se rompent : des pans entiers de montagne peuvent alors s'effondrer. Les archives photographiques, remontant au XIX^{e} siècle, confirment le lien entre hausse des températures et fréquence des écroulements, avec une nette intensification depuis les années 1950 et des événements majeurs lors des canicules de 2003 et 2005.

D'ici à la fin du siècle, le pergélisol pourrait presque disparaître des Alpes, ne subsistant qu'à très haute altitude. Les montagnes continueront alors de s'effondrer : non plus seulement au rythme lent de la géologie, mais sous l'effet accéléré du climat. ■

Loïc Chauveau

NEUROSCIENCES

Pour quelle raison l'envie d'uriner s'intensifie à l'approche des toilettes ?

Mourad D.

Lorsque l'on se rapproche des toilettes, l'envie d'uriner devient plus forte car le cerveau interprète le contexte comme un « feu vert biologique ». Lorsque la vessie est bien remplie, des signaux remontent jusqu'au cortex préfrontal, qui freine normalement le réflexe urinaire. Mais dès que l'environnement suggère que les toilettes sont accessibles, cette inhibition s'allège. Depuis l'enfance, nous associons les toilettes à la possibilité de se soulager sans contrainte. Ainsi, par apprentissage, le cerveau anticipe le soulagement et amplifie la sensation d'urgence. ■ **Lise Loumé**

BIOLOGIE

Sommes-nous sensibles aux phéromones ?

David M.

Contrairement aux insectes, aucune molécule n'a démontré un effet inné, universel et reproductible sur nos comportements — des critères indispensables pour parler de phéromone. Les « parfums aphrodisiaques », vantés par l'industrie et contenant de l'androstadiénone ou de l'estratétraénol, n'ont montré aucun effet mesurable sur le désir. Les effets de notre odorat relèvent surtout du contexte et de l'apprentissage, plus que d'un réflexe biologique. Une exception toutefois, qui intrigue encore les chercheurs : les nouveau-nés, chez qui certaines odeurs semblent encore déclencher des réponses quasi instinctives. ■ **L. L.**

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

La route électrique trace sa voie

« La route électrique trace sa voie »
(Sciences et Avenir n° 948, février 2026)

Votre article sur l'expérimentation de recharge dynamique sur l'A10 souligne à juste titre le potentiel de cette technologie pour réduire la taille des batteries et le coût des véhicules électriques. Cependant, pour être pertinente cette réduction suppose que l'ensemble du réseau routier soit équipé de systèmes de recharge en roulant. Or, avec 900 bobines de cuivre pour 1,5 km de route, une telle généralisation semble irréaliste à court terme. **Bruno Bourga**

S. et A. : Il s'agit là d'une vitrine technologique pour présenter ce que pourrait être l'autoroute de demain. Cependant, ce projet n'est pas totalement utopique. S'il implique l'engagement de travaux coûteux, la mise en place d'une autoroute dont la voie de droite uniquement serait équipée de boucles d'induction dans les deux sens de circulation, le coût global de l'opération devrait être comparable à celui de la création d'une ligne de TGV. Par ailleurs, d'autres optimisations sont encore possibles. Par exemple, l'utilisation de supercondensateurs dans les véhicules en association avec des batteries pourrait permettre d'envisager des « impulsions de charges » beaucoup plus intenses mais ponctuelles, ce qui permettrait d'espacer considérablement les bobines noyées dans la chaussée.

Bande magnétique

L'article sur la revanche de la bande magnétique m'a intéressé. Comme avantage, il est dit que, hors de son lecteur, la bande ne peut être corrompue par des attaques informatiques. En fait un disque dur non alimenté a les mêmes propriétés, non ? Par ailleurs, le temps d'accès me paraît problématique : avec le système décrit de centre de stockage robotisé qui apporte la cartouche désirée dans le lecteur, plus le temps de dérouler la bande pour arriver à l'information, il doit s'écouler des dizaines de secondes de latence ; avec un disque dur on compte en millisecondes… **Bruno Saillard**

S. et A. : C'est vrai, un disque non alimenté ne peut pas être attaqué. Mais dans les centres de données, les disques sont connectés en permanence, tandis que la bande est vraiment isolée lorsqu'elle n'est pas consultée. En effet, le temps d'accès constitue la principale limite de la bande : la latence peut atteindre plusieurs dizaines de secondes. Elle est donc destinée aux données « froides » (archives scientifiques, sauvegardes…), un marché loin d'être marginal comme l'indique l'article.

Étés torrides

Dans l'article sur le nombre de jours d'été en plus d'ici à 2100 (*S. et A.* n° 947), vous écrivez que les vagues de chaleur récentes reproduisent celles d'il y a 6000 ans. À cette époque, il y avait moins d'humains sur Terre et ils ne produisaient pas autant de CO_2. Comment expliquez-vous ce paradoxe ?

Marc Provot

S. et A. : Nul paradoxe ici. Les scientifiques prennent en compte les phénomènes naturels ainsi que les émissions anthropiques pour leurs estimations climatiques, les climats passés leur servant d'étalons. Il y a 6000 ans, c'est une variation de l'orbite terrestre seule qui provoquait de longs étés. Aujourd'hui, l'apport des émissions humaines de CO_2 est majoritairement responsable, provoquant la diminution du gradient de température entre l'Arctique et l'équateur.

LE CIEL D'AVRIL

PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

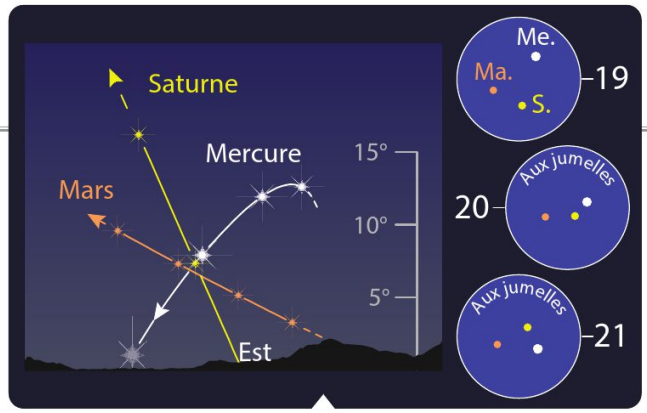
MERCURE La petite planète atteint sa plus grande distance angulaire (près de 28°) à l'ouest du Soleil le 4. Malgré cette élongation intéressante, elle n'est pas observable, plaquée sur l'horizon par un écliptique bien peu relevé en cette saison le matin et noyée dans les lueurs de l'aube.

VÉNUS L'étoile du Berger, extrêmement brillante, est visible en soirée dans la direction du Soleil couchant. Elle passe sous l'horizon 1h50 après l'astre du jour en début de mois et 2h30 après lui en fin de mois.

MARS La planète Rouge n'est pas observable pour les mêmes raisons que Mercure, une planète dont elle est proche en avril.

JUPITER Très brillante, la plus massive des planètes est visible en soirée, haute dans le ciel, et une grande partie de la nuit, tout en glissant lentement vers l'horizon nord-ouest. Ses quatre plus gros satellites sont accessibles aux jumelles et changent de position d'une nuit sur l'autre.

SATURNE Moins d'un mois après son passage en conjonction, la planète aux anneaux est encore bien proche de la direction du Soleil. Pour les mêmes raisons que Mercure et Mars, elle n'est pas observable. Elle réapparaîtra progressivement dans le ciel du matin au cours des mois à venir.



Positions de Mercure et de Mars les 1er, 10, 20 et 30 avril, de Saturne les 20 et 30, à La Réunion, 1 h avant le lever du Soleil. Le trio est observable conjointement aux jumelles autour du 20.

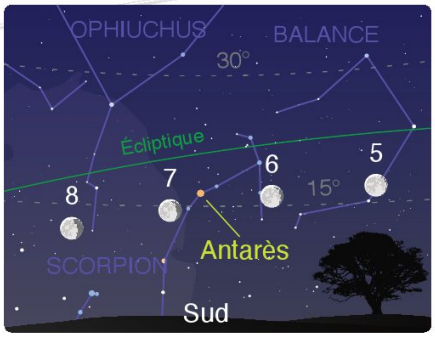
Un trio de planètes à La Réunion

UNE HEURE AVANT LE LEVER DU SOLEIL, depuis La Réunion et aux latitudes équivalentes, l'écliptique très relevé permet d'observer simultanément Mars, Mercure et Saturne, basses mais bien visibles au-dessus de l'horizon est. Cette configuration favorable est liée à la latitude : en Métropole, les trois planètes restent bien trop proches de l'horizon pour être observables.

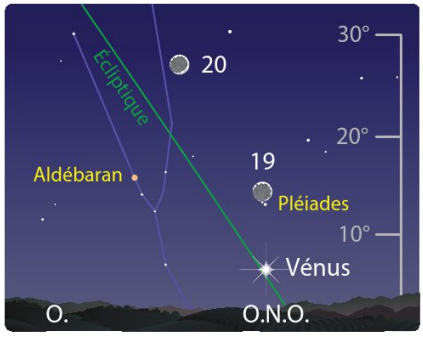
Notre conseil Le rapprochement est visible à l'œil nu. Les jumelles, utiles mais non indispensables, permettent de mieux distinguer Mars et Saturne. Choisissez un horizon est parfaitement dégagé et repérez d'abord Mercure, la plus brillante.

L'appli du mois

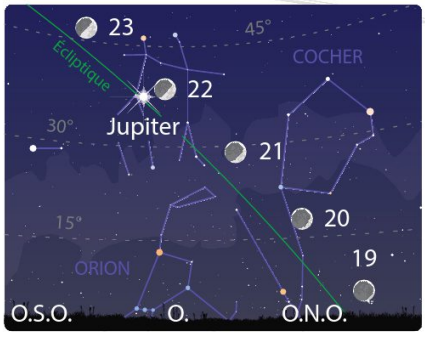
SIRIUS STARS est une application gratuite pour Android et iOS qui propose un fil d'actualité astronomique en temps réel. Elle signale les passages de la Station spatiale internationale, les aurores, les objets proches de la Terre ou les découvertes récentes avec des alertes personnalisables.



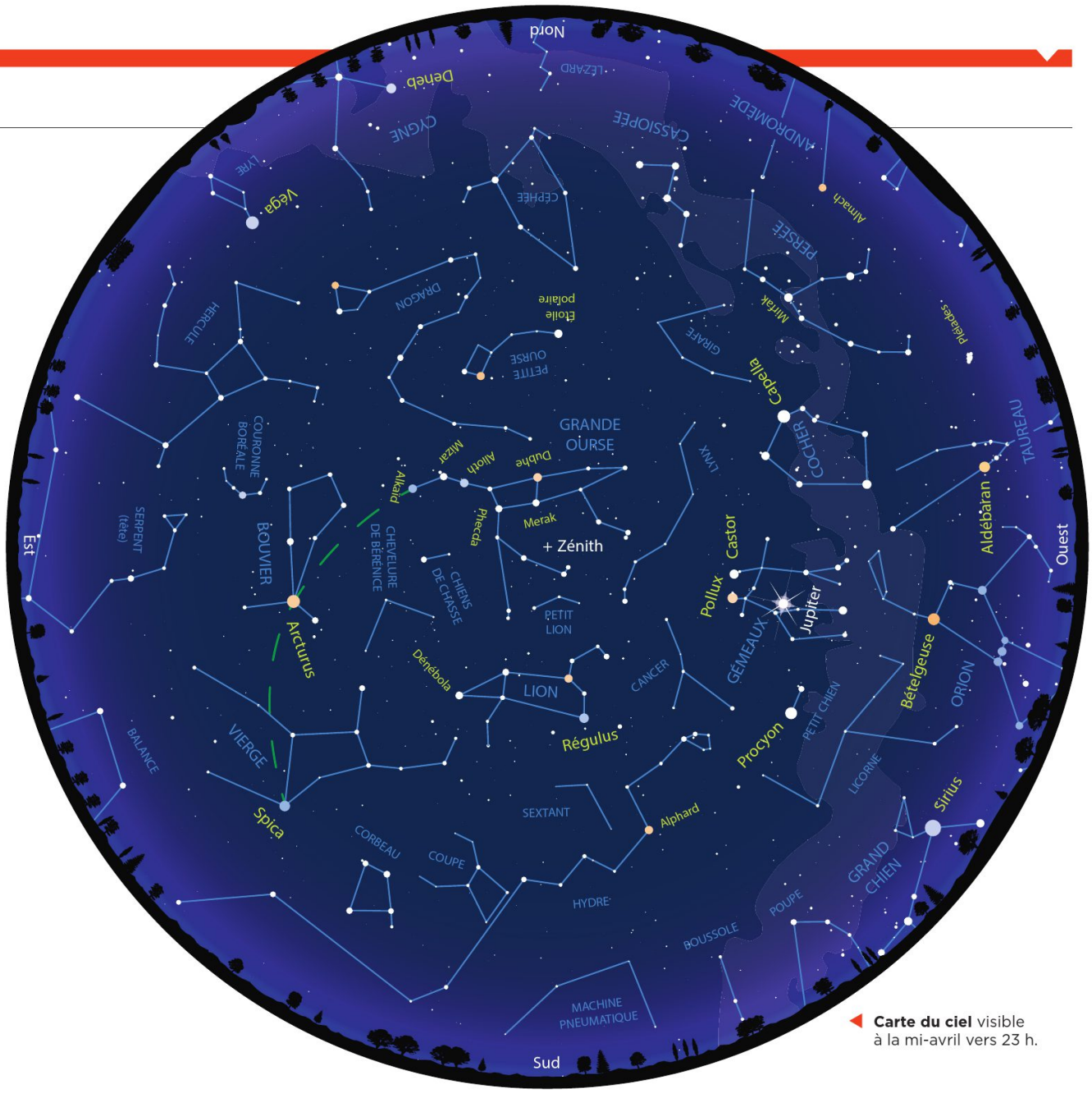
LE 7, 2 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL, la Lune gibbeuse décroissante sera à 4° d'Antarès la rouge, l'étoile principale de la constellation estivale du Scorpion.



LE 19, 1H30 APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, le fin croissant lunaire est encore très proche de l'amas d'étoiles des Pléiades et surplombe l'étincelante planète Vénus.



ENTRE LE 19 ET LE 23, VERS 23 H, Suivez l'avancée de la Lune à travers le zodiaque. Vous la verrez s'approcher puis, le 22, dépasser la brillante Jupiter dans les Gémeaux.



Carte du ciel visible à la mi-avril vers 23 h.

La Lune

Pleine Lune: jeudi 2 à 4 h (la Lune se trouve alors dans la constellation de la Vierge)

Dernier quartier: vendredi 10 à 7 h (Sagittaire)

Nouvelle Lune: vendredi 17 à 14 h (Poissons)

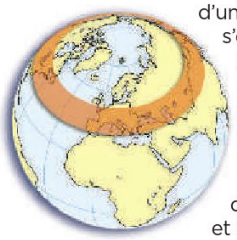
Premier quartier: vendredi 24 à 5 h (Cancer)

Le Soleil

(à Paris)	Lever	Coucher
1er avril	7h30	20h20
30 avril	6h34	21h03

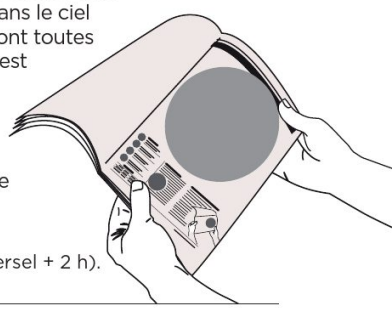
D'où voir le ciel

Notre carte tracée pour une latitude de 47° nord montre le ciel visible en France métropolitaine, et plus largement en Europe et dans le monde, à l'intérieur d'une bande s'étendant de 40 à 54° de latitude nord. Si vous êtes au nord du 47e parallèle, l'étoile Polaire sera plus haute dans votre ciel, et plus basse dans le cas contraire.



Comment utiliser cette carte

Faites tourner votre magazine sur lui-même, de façon que le nom de la direction dans laquelle vous observez soit écrit à l'endroit. Les constellations et les étoiles que vous retrouverez dans le ciel qui vous fait face sont toutes celles dont le nom est lisible sans trop pencher la tête. La position des planètes visibles à l'œil nu est indiquée pour le 15 du mois.



Les heures sont données en heure légale française (temps universel + 2 h).

Suivez-nous au quotidien sur le Web

www.sciencesetavenir.fr

ENTRETIEN

« Wikipédia a beaucoup de valeur pour l'IA »

SCIENCES ET AVENIR

À l'occasion des 25 ans de l'encyclopédie libre, *Sciences et Avenir* a rencontré Rémy Gerbet, le directeur de Wikimédia France. Celui-ci revient en vidéo sur les défis que représentent les nouveaux usages de l'IA pour le fonctionnement de Wikipédia. **sciav.fr/950wiki**

ANIMAUX

Un bonobo qui a de l'imagination

APEINITIATIVE

Déjà célèbre pour son apprentissage du langage, le singe Kanzi a démontré au cours d'expériences filmées qu'il avait, comme les humains, la capacité de se représenter des objets imaginaires… et de l'humour ! **sciav.fr/950kanzi**

Le top 5 du mois

- **Il y a 10 ans, les ondes gravitationnelles devenaient les nouvelles messagères du cosmos.** sciav.fr/950ondes
- **Fermeture pour pollution d'une plage emblématique au Pérou.** sciav.fr/950perou
- **Combien de fois pétons-nous par jour ? Une expérience insolite.** sciav.fr/950flat
- **De quel bois sont faits les violons Stradivarius ?** sciav.fr/950strad
- **Une énorme météorite stoppée à la douane en Russie.** sciav.fr/950meteor

VINCENT THOMAS

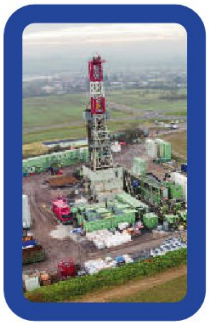
DÉCRYPTAGE

Un condensé de l'humanité sur la Lune

Sciences, génomes, œuvres d'art… Le projet international Sanctuary on the moon entend graver l'essentiel de notre civilisation sur 24 disques de saphir pour en faire une capsule temporelle à envoyer sur la Lune d'ici à 2030 avec le programme Artemis de la Nasa. Explications en vidéo avec l'astronaute Jean-François Clervoy, ambassadeur de cette étonnante archive de l'humanité. sciav.fr/950moon

LES SUJETS QUI VOUS FONT RÉAGIR

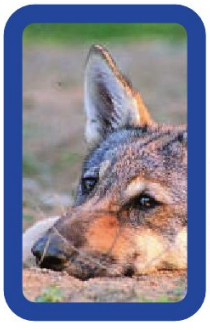
SUR LES RÉSEAUX SOCIAUX



AFP

LinkedIn

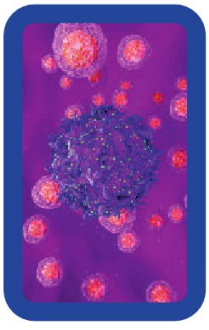
Pourra-t-on prochainement exploiter en Lorraine des millions de tonnes d'hydrogène naturel, possible source d'énergie décarbonée ? Les recherches s'intensifient autour de ce gisement souterrain potentiellement unique au monde. **sciav.fr/950hydro**



STOCKHOLMUNIVERSITY

Instagram

Le loup montre de l'attachement pour certains humains, révèlent des tests comportementaux. L'attachement de ces canidés aurait donc préexisté à la domestication du chien (*Canis familiaris*). **sciav.fr/950loup**



AFP

Facebook

Le Danemark entre dans l'histoire en devenant le premier pays de l'Union européenne à éradiquer la transmission du VIH et de la syphilis de la mère à l'enfant, une *« avancée majeure en santé publique »*, selon l'OMS. **sciav.fr/950vih**

LABORATOIRES ILAPHARM
ilapharm.com

Des solutions santé naturelle adaptées pour vous !

"Les produits des Laboratoires ILAPHARM me conviennent tout à fait, ils sont efficaces."
Avis vérifiés Juin 2025 - Rita M. ★★★★★

OFFRE DÉCOUVERTE
TOUT À 7€*

**Offre valable 2 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

Retrouvez, sur le bon de commande, la quantité recommandée par nos experts pour une efficacité optimale de nos produits !

ARTICULATIONS
- Mobilité plus aisée
- Souplesse et confort articulaire
- 100% Harpagophytum *(1)*

45 gélules
Durée : 15 jours

OS & ARTICULATIONS
- Constituant naturel des muscles, os et cartilages
- Formation du collagène

500 ml
Durée : 20 jours
~~23,60€~~

JAMBES LOURDES
- Active la circulation sanguine
- Légèreté et confort des jambes

45 gélules
Durée : 15 jours

CAPITAL-VISION
- Préserve la vision au quotidien
- Bonne clarté visuelle *(11)*

10 ampoules
Durée : 10 jours
~~20,50€~~

LIBIDO
- Source d'énergie
- Aphrodisiaque
- Stimule le désir sexuel
- Idéal avec le Safran BIO !

45 comprimés
Durée : 15 jours

SEXUALITÉ
- Stimule l'érection
- Forte concentration en actifs (crocines)
- Idéal avec la Maca BIO ! *(8)*

20 gélules
Durée : 10 jours

VIDER SA VESSIE
- Envies intempestives d'uriner
- Efficacité prouvée dès 4 semaines

45 gélules
Durée : 15 jours

PROSTATE
- Confort urinaire
- En cas de mauvais débit urinaire
- Prostate et vessie

45 capsules
Durée : 22 jours

SOMMEIL
- Calme et apaise
- Sommeil de qualité
- Ni accoutumance, ni somnolence

45 gélules
Durée : 22 jours

CHOLESTÉROL
- Régulation du cholestérol
- Bonne santé cardiovasculaire *(9), (10)*

30 gélules
Durée : 10 jours

MINCEUR
- Brûle-graisse naturel
- Besoin de perdre du poids
- Idéal avec le Nopal BIO ! *(1), (2), (4), (13)*

45 gélules
Durée : 15 jours

CAPTEUR DE GRAISSES
- Association brevetée de fibres alimentaires
- Idéal avec le Guarana BIO !

45 gélules
Durée : 8 jours

STRESS
- En cas de stress et fatigue passagère
- Magnésium et B6 : association optimale

*Allergène : **poisson**. (5)*

45 gélules
Durée : 22 jours

FOIE - DRAINEUR
- Favorise le fonctionnement du foie
- Détoxifie *(4), (6), (7)*

10 ampoules
Durée : 5 jours
~~17,70€~~

IMMUNITÉ
- Fonctionnement du système de défenses naturelles
- Idéal toute l'année ! *(7), (14)*

45 gélules
Durée : 15 jours

OLIGO-ÉLÉMENT
- Oligo-élément essentiel
- Vision, os, cerveau immunité
- Forme assimilable

30 comprimés
Durée : 1 mois
~~13,00€~~

Produits déconseillés aux moins de 18 ans et aux femmes enceintes ou allaitantes. (1) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal. (2) Contient de la caféine (50 mg par jour). (3) Déconseillé en cas de d'allergie croisée connue, en particulier à la famille des Apiaceae ou au pollen d'armoise ou à l'anéthole. (4) Déconseillé en cas de troubles de la thyroïde. (5) Ne convient pas aux insuffisants rénaux. (6) Ne pas consommer en cas de maladie des voies biliaires et hépatiques. (7) Déconseillé en cas d'allergie aux Asteraceae. (8) Ne pas associer avec des antidépresseurs. (9) Ne pas associer avec des anticoagulants. (10) Déconseillé en cas de traitement concomitant par un médicament anti-rétroviral. (11) En cas de troubles digestifs consultez votre médecin avant consommation. (12) Espacez la prise de médicaments de celle de ce produit d'au moins 2h. (13) Déconseillé en cas de troubles cardiaques. (14) Déconseillé en cas de pathologie du système immunitaire. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits. Deux verres : Larg. haut 7,3 cm et bas 6,5 cm ; Haut. : 8,5 cm ; capacité environ : 220 ml.

VOS CADEAUX

Le Duo de Verres

OFFERT Dès 20€ d'achat

0€ Livraison
Dès 25€ d'achat
Au lieu de ~~6,50€~~

Commandez sur :
ilapharm.com

2ème CADEAU OFFERT
Dès 30€ d'achat

COMMANDEZ SUR :
ilapharm.com
ou avec votre smartphone

CODE PRIVILÈGE :
CB599

OFFRE DÉCOUVERTE - SANS ENGAGEMENT

POUR COMMANDER :

@ **ilapharm.com**
Possibilité de régler par chèque

LABORATOIRES ILAPHARM
27, rue de Solférino - 92100 BOULOGNE-BILLANCOURT
01 49 09 11 11
Du lundi au vendredi 9h -13h et 14h -18h

COORDONNÉES ☐ Mme ☐ Mr

Nom, Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....
.....
Tél. : ..... Date d'anniversaire : |_|_| |_|_| |_|_|_|_|
E-mail : .....
Pour recevoir les **Offres mails de nos partenaires** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

MODE DE PAIEMENT

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**
N° |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
Date d'expiration : |_|_| |_|_|
Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|
Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :**
○ débit immédiat
○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

GARANTIES

SATISFAIT OU GARANTIE 1 MOIS REMBOURSÉ

PAYEZ DANS 1 MOIS
Envoyez votre **règlement par chèque, avec votre bon de commande,** il ne sera encaissé que dans 1 mois.

Charte Qualité fevad · synadiet · La Poste 72h

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38112 €, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité du cadeau, il sera remplacé par un autre d'une valeur similaire. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits du Règlement européen sur la protection des données, écrivez-nous ou voir nos C.G.V sur notre site ilapharm.com/condition-generales-de-vente. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés (détails articles L.217-4 et suivants du Code de la consommation). Délai de rétractation : 30 jours après livraison de votre commande, pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitement de la commande : 48h suivant sa réception, livraison après 72h d'acheminement environ. Nous adhérons à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 mediateurduecommerce@fevad.com). ADEME emballages et papiers : FR202486_01JWKA, Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, www.mangerbouger.fr. Cochez la case, pour ne pas recevoir nos offres ☐, celles de nos partenaires ☐, ou écrivez-nous.

Quantité RECOMMANDÉE pour une CURE COMPLÈTE

NOM DU PRODUIT	RÉF.		QTÉ	PRIX UNITAIRE	TOTAL
ARTICULATIONS - Harpagophytum BIO	PHAB45	x3		7€	
OS - Silicium Organique et Vitamine C	PSI	x3		7€	
JAMBES LOURDES - Vigne Rouge BIO	PVRB45	x3		7€	
VISION - Myrtille Myrobalan BIO	PXMMB	x3		7€	
LIBIDO - Maca BIO	PMAB45	x3		7€	
SEXUALITÉ - Safran BIO	PSFB20	x3		7€	
VESSIE - Saw Palmetto BIO	PSPB45	x3		7€	
PROSTATE - Huile de Courge BIO	PPCB45	x2		7€	
SOMMEIL - Passiflore BIO	PPAB45	x3		7€	
CHOLESTÉROL - Ail Noir BIO	PANB30	x3		7€	
MINCEUR - Guarana BIO	PGUB45	x3		7€	
CAPTEUR DE GRAISSES - Nopal BIO	PNOB45	x3		7€	
STRESS - Magnésium Marin et B6	PMM45	x3		7€	
DRAINEUR - Artichaut - Radis Noir BIO	PXRAB	x3		7€	
IMMUNITÉ - Echinacéa BIO	PECB45	x3		7€	
OLIGO-ÉLÉMENT - Zinc	PCZN	x3		7€	
☐ Ma commande atteint 20€, je reçois mon **DUO DE VERRES**					**OFFERT**
☐ Ma commande atteint 25€, **j'économise 6,50€ sur la livraison**					**OFFERTE**
☐ Ma commande est inférieure à 25€, **je rajoute 6,50€ de livraison**					
Code Privilège : **CB599**				**TOTAL À RÉGLER**	..... €

Écrire en motif écossais pour vous vendre un saumon d'Écosse, ça vaut pas le coup.

Par contre payer son saumon fumé d'Écosse

-20% LIDL Plus

7.99 € ~~9.99€~~

Transformé en POLOGNE

Rayon frais

ça vaut le coup.

LIDL

Ça vaut le coup.

320 g (1 kg = 24,97 €) avec Lidl Plus au lieu de 9,99 € (1 kg = 31,22 €). En vente le 02/04 - Année 2026 - Photos non contractuelles - Sauf erreurs typographiques - LIDL RCS Nanterre 343 262 622

Pour votre santé, évitez de grignoter entre les repas. www.mangerbouger.fr